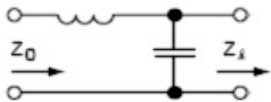
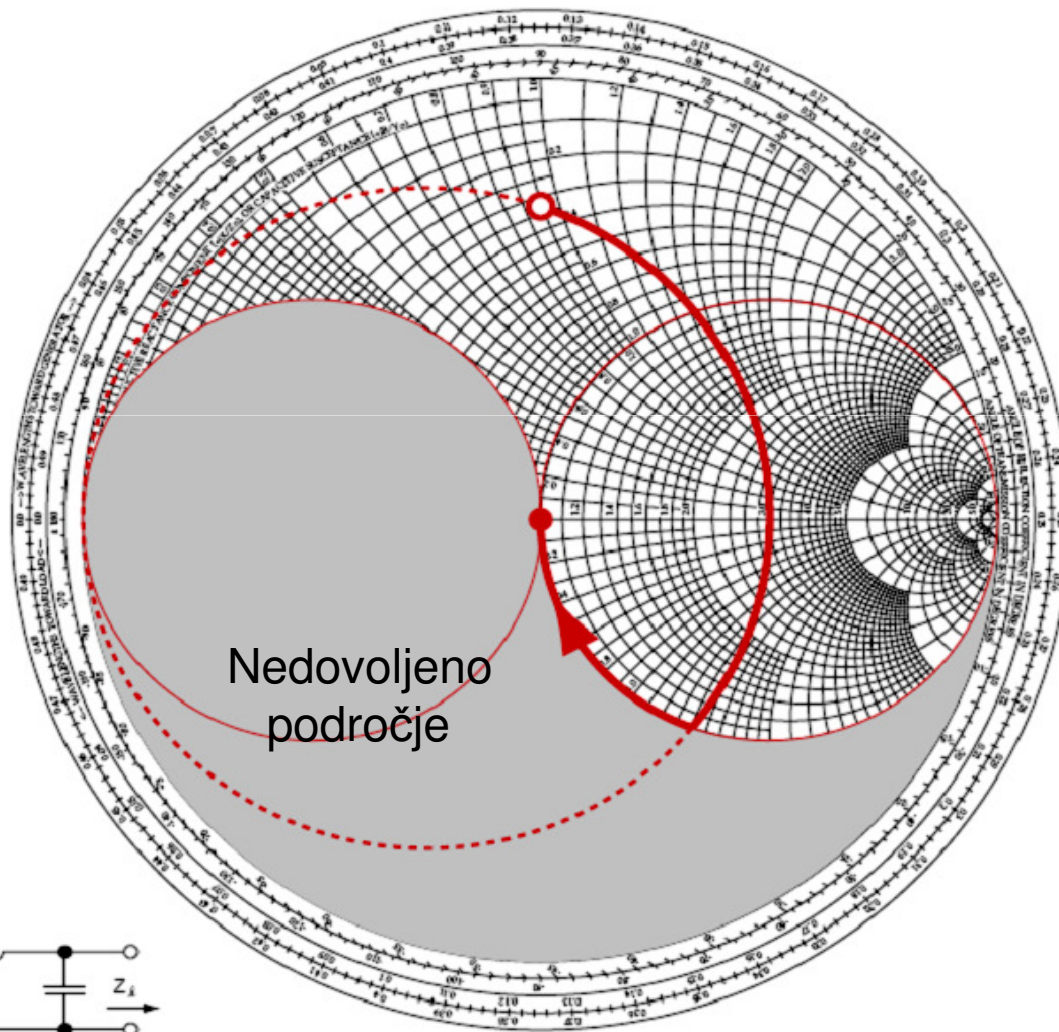


Impedančno prilagajanje ¹

Mobitel d.d.,
izobraževanje

18. 12. 2009,
predavanje 28

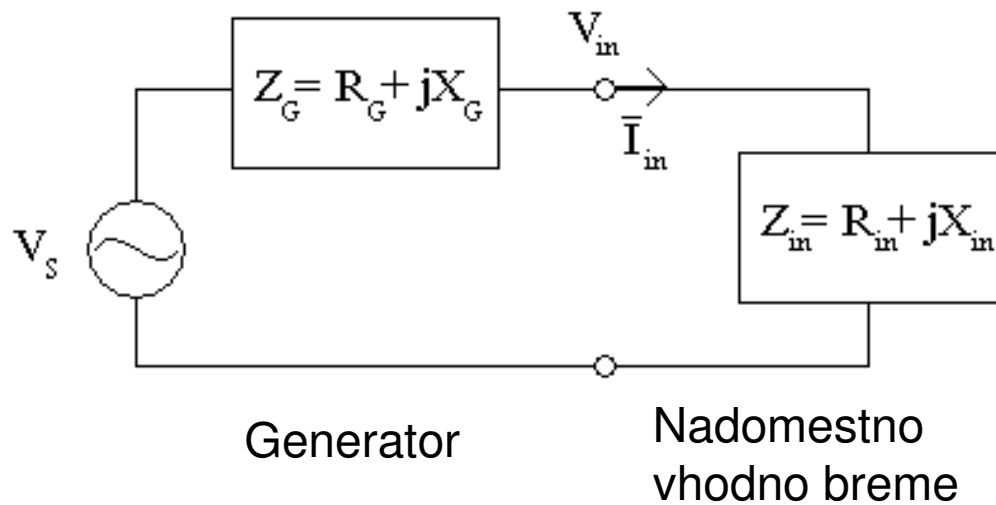
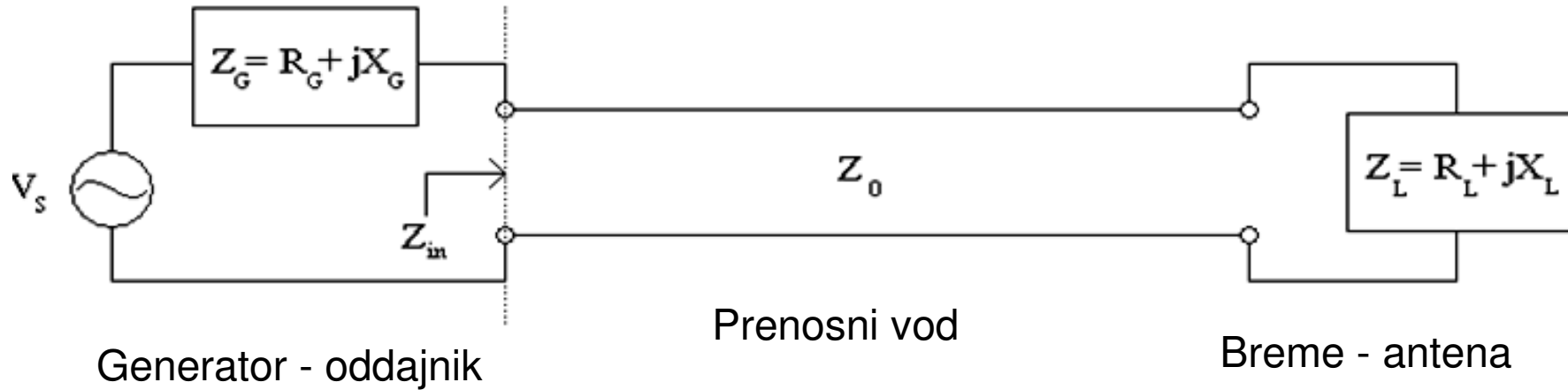
Prof. dr. Jožko
Budin



Vsebina

1. Prilagajanje splošno
2. Prenašana moč na liniji
3. Slabljenje zaradi neprilagojenosti
4. Povišanje izgub zaradi neprilagojenosti
5. Prilagodilni načini
 - Impedančni transformator
 - Reaktivna vezja
 - Linijske ubiralke
6. Večstopenjski transformatorji
7. Zvezni transformatorji
8. Primeri ubiranja
9. Vzporedna in zaporedna linijska ubiralca
10. Dosegljiva in nedosegljiva območja impedance

Prenos in nadomestna vezava



Optimalni prenos:

$$R_{in} = R_g \quad X_{in} = -X_G$$

Čemu impedančno prilagajanje?

4

Impedanco antene prilagajamo (ubiramo) na prenosni vod z namenom, da bi dosegli te cilje:

- **Optimalen prenos moči**

Generator napetosti U_g in notranje impedance Z_g prenaša v prilagojeno breme impedance $Z_b = Z_g^*$ največjo možno moč $P = |U_g|^2 / 8R_g$. To velja tudi v primeru, ko je generator povezan z bremenom preko prenosnega voda; pravilo konjugirane prilagoditve velja povsod, na priključkih generatorja in bremena ali kjerkoli na preseku prenosnega voda. Če ni prilagojen, prenosni sistem ne more prenašati celotne razpoložljive moči.

- **Manjše izgube na daljšem prenosnem vodu**

Pri enaki prenašani moči porablja neubran prenosni vod več izgubne moči v kovini in dielektriku, kot bi jo porabljal ubran vod s prilagojenim bremenom. Pojav je pomemben zlasti v primeru prenosnega voda večje dolžine in večje neubranosti.

- **Manjša frekvenčna odvisnost prenosnega sistema**

Čim bolj je linija neprilagojena, tem bolj so valovni pojavi na njej odvisni od frekvence. Frekvenčno odvisnost zmanjšamo s prilagoditvijo generatorja in bremena na prenosni vod v zadosti širokem frekvenčnem pasu. Vrhu tega je koristno, da se zmanjša tudi odvisnost prilagoditve od dolžine prenosnega voda, ki se lahko v praksi pogosto spreminja.

Osnovne relacije med parametri

5

Γ ... Odbojnost

S ... Razmerje stojnega vala, VSWR

z ... Normirana impedanca Z/Z_k

Z_k ... Karakteristična impedanca voda

Absolutne vrednosti:

$$S = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

$$|\Gamma| = \frac{S - 1}{S + 1}$$

Kompleksna števila:

$$z = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}$$

$$\Gamma = \frac{z - 1}{z + 1}$$

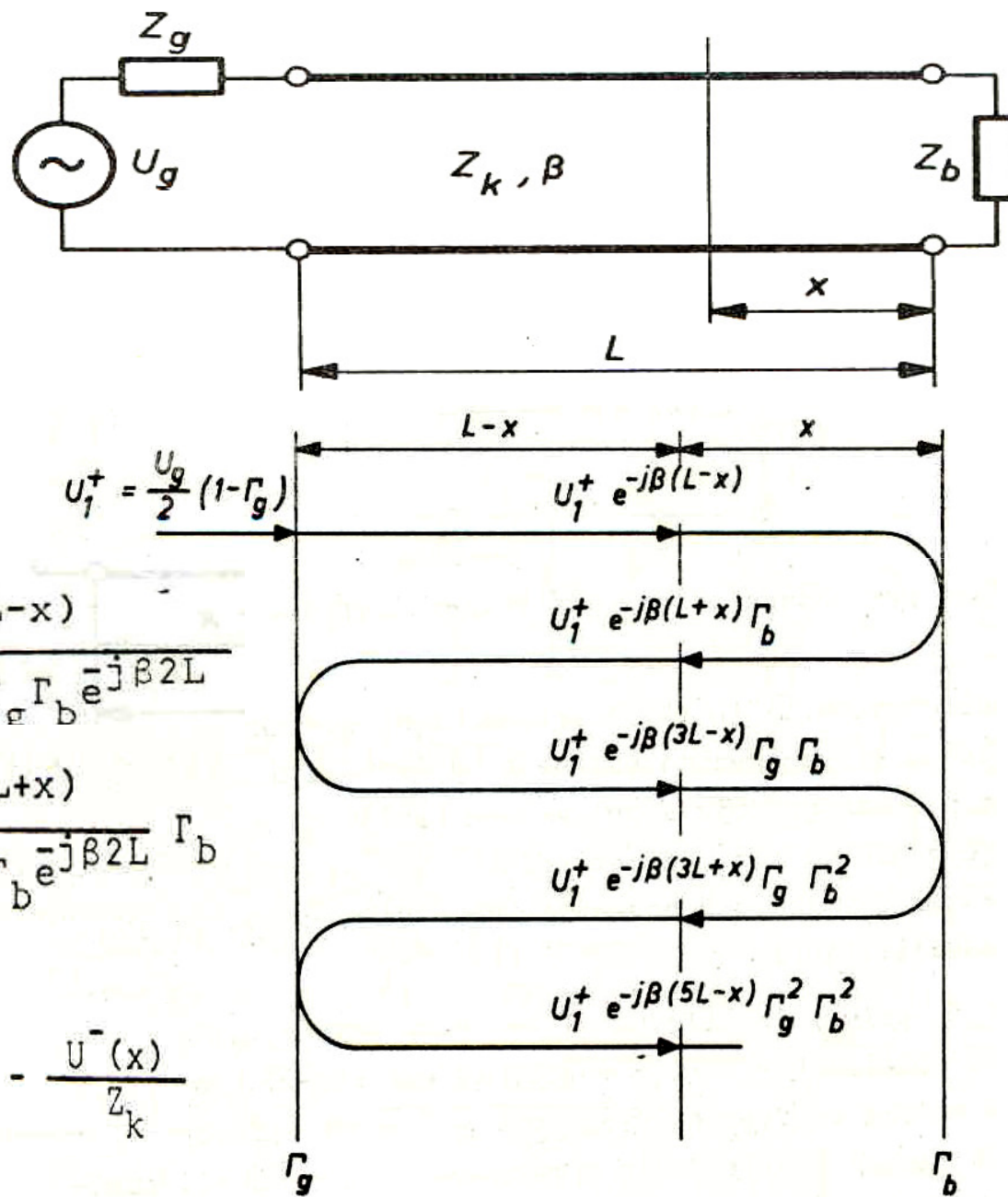
Terminologija in običajne oznake

6

- Prenosna linija, prenosni vod
- Karakteristična impedanca Z_k, Z_0 (Ω)
- Obremenilna impedanca Z_b, Z_L, Z_R
- Impedanca generatorja (vira) Z_g, Z_s
- Normirana impedanca in admitanca, $z = Z/Z_k$,
 $y = Y/Y_k$
- Prilagajanje, ubiranje, ubiralka
- Potujoči val, napredujoči, vpadni, odbiti val
- Stojni val, stoječi val
- Odbojnost (stojnega vala) Γ
- Razmerje stojnega vala σ, s, S, SWR (VSWR)
- Prenášana delovna moč P

Potujoči valovi napetosti in toka

- vpadni val napetosti
- vpadni val toka
- odbiti val napetosti
- odbiti val toka



$$U^+(x) = \frac{U_g}{2} (1 - \Gamma_g) \frac{e^{-j\beta(L-x)}}{1 - \Gamma_g \Gamma_b e^{-j\beta 2L}}$$

$$U^-(x) = \frac{U_g}{2} (1 - \Gamma_g) \frac{e^{-j\beta(L+x)}}{1 - \Gamma_g \Gamma_b e^{-j\beta 2L}} \Gamma_b$$

$$I^+(x) = \frac{U^+(x)}{Z_k}$$

$$I^-(x) = - \frac{U^-(x)}{Z_k}$$

Moč na liniji

Napetost na liniji:

$$U(x) = U^+(x) + U^-(x) = \frac{U_g}{2} (1 - \Gamma_g) \frac{e^{-j\beta(L-x)}}{1 - \Gamma_g \Gamma_b e^{-j\beta 2L}} (1 + \Gamma_b e^{j\beta 2x})$$

Delovna moč na liniji:

$$P_d = \frac{1}{2} \operatorname{Re} (U(x) I^*(x))$$

$$P_d = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{|U^+(x)|^2}{Z_k} (1 + \Gamma(x))(1 - \Gamma^*(x)) \right\}$$

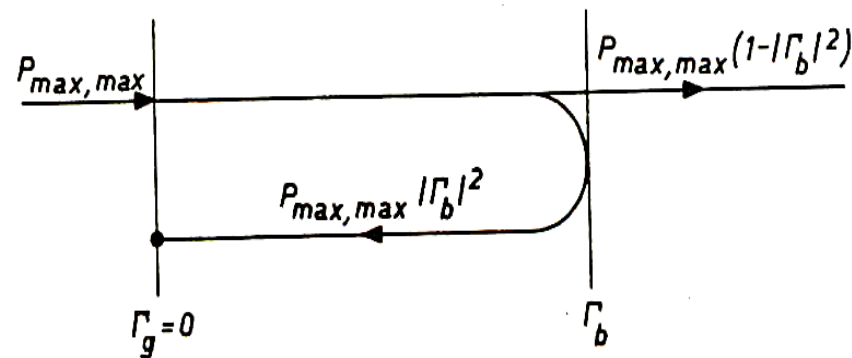
$$P_d = \frac{1}{2} \frac{|U^+(L)|^2}{Z_k} (1 - |\Gamma_b|^2)$$

$$P_d = \frac{|U_g|^2}{8 Z_k} \frac{|1 - \Gamma_g|^2 (1 - |\Gamma_b|^2)}{|1 - \Gamma_g \Gamma_b e^{-j\beta 2L}|^2}$$

$$\frac{|U_g|^2}{8 Z_k} |1 - \Gamma_g|^2 = \frac{|U_g|^2}{8 R_g} (1 - |\Gamma_g|^2)$$

$$P_d = \frac{|U_g|^2}{8 R_g} \frac{(1 - |\Gamma_g|^2)(1 - |\Gamma_b|^2)}{|1 - \Gamma_g \Gamma_b e^{-j\beta 2L}|^2}$$

Prenos in odboj:



Delovna moč na prenosnem vodju

9

1. Največja delovna moč pri $\Gamma_g = \Gamma_b = 0$ oz. pri konjugirano kompleksni prilagoditvi

$$P_{\max, \max} = \frac{|U_g|^2}{8Z_k} \frac{|1 - \Gamma_g|^2}{1 - |\Gamma_g|^2} = \frac{|U_g|^2}{8R_g} \quad \text{pri} \quad \Gamma_b = (\Gamma_g e^{-j\beta 2L})^*$$

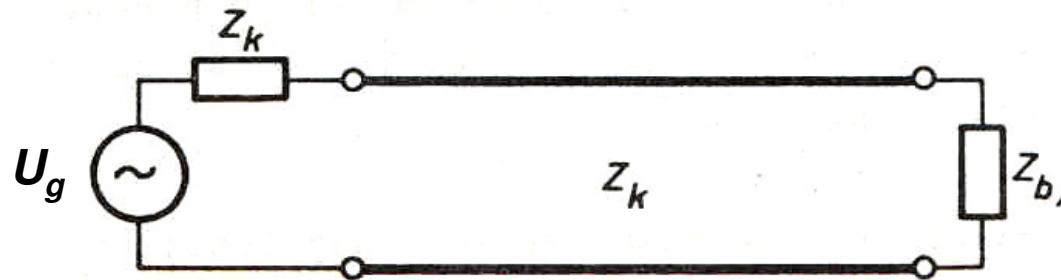
$$\Gamma_b e^{-j\beta 2x} = (\Gamma_g e^{-j\beta 2(L-x)})^* = \Gamma_g^* e^{j\beta 2(L-x)}$$

Konjugirano kompleksna prilagoditev (levo-desno) na mestu x linije

2. Odbojno slabljenje (pri prilagojenem generatorju)

$$L_{\text{odbojno}} = 10 \log (P_{\text{vpadni}}/P_{\text{odbiti}}) = -20 \log |\Gamma|$$

Največja in najmanjša prenašana moč¹⁰



Največja možna delovna moč
(razpoložljiva moč generatorja):

$$P_{\max, \max} = |U_g|^2 / 8R_g$$

Največja delovna moč:

$$P_{d \max} = P_{\max, \max} \frac{(1 - |\Gamma_g|^2)(1 - |\Gamma_b|^2)}{(1 - |\Gamma_g \Gamma_b|)^2}$$

Najmanjša delovna moč:

$$P_{d \min} = P_{\max, \max} \frac{(1 - |\Gamma_g|^2)(1 - |\Gamma_b|^2)}{(1 + |\Gamma_g \Gamma_b|)^2}$$

Moč izražena z razmerjem stojnega vala:

$$P_{d \max} = P_{\max, \max} \frac{4 S_g S_b}{(S_g + S_b)^2}$$

$$S = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} > 1$$

$$P_{d \min} = P_{\max, \max} \frac{4 S_g S_b}{(1 + S_g S_b)^2}$$

Slabljenje na prenosnem vodju 2/2

11

4. Neprilagodilno slabljenje (pri prilagojenem generatorju)

Razmerje v dB prenašane delovne moči in moči vpadnega vala (ki pomeni delovno moč na prilagojeni liniji)

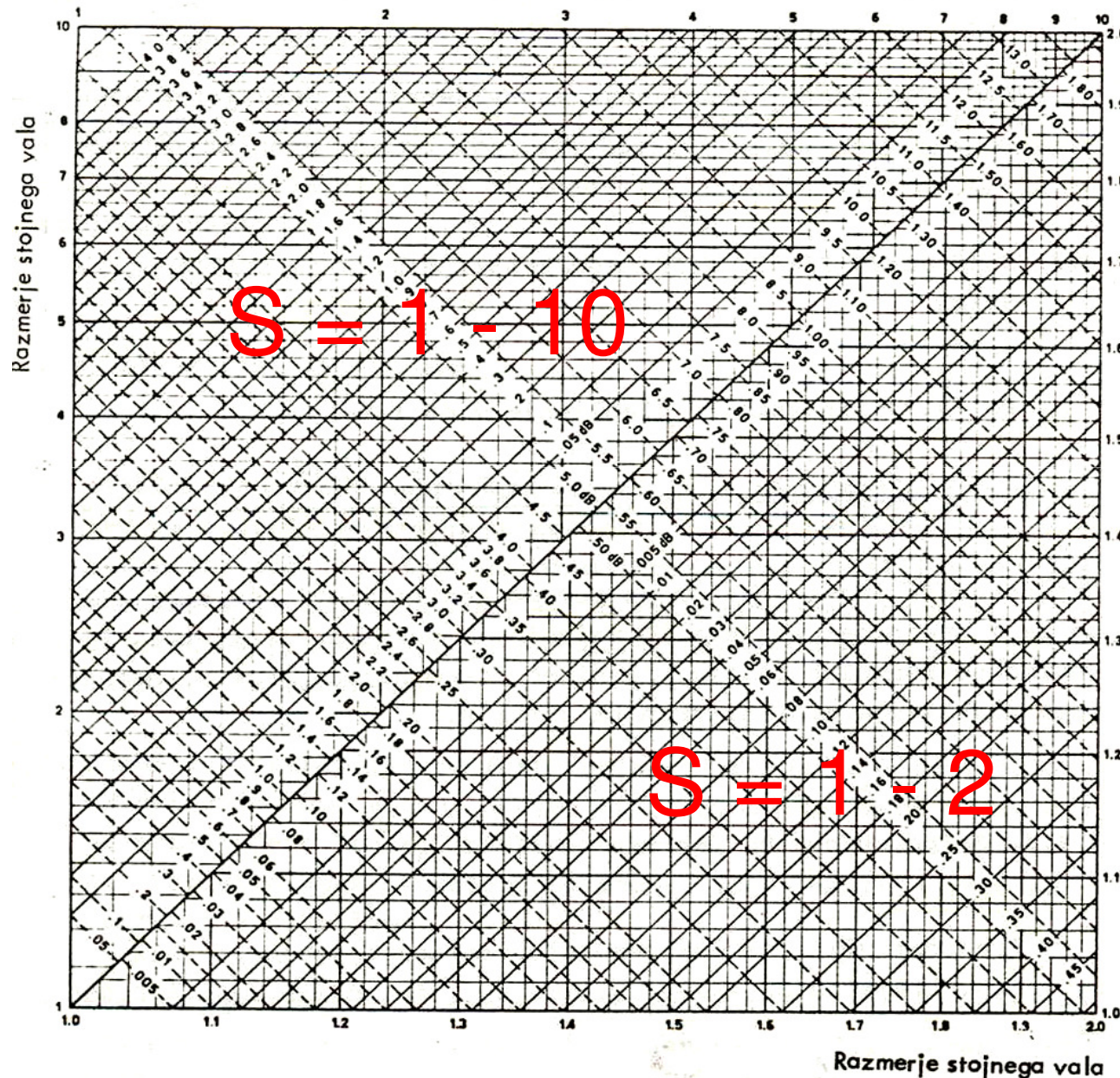
$$L_{\text{db}} = -10 \log((P_{\text{vpadni}} - P_{\text{odbiti}}) / P_{\text{vpadni}}) = -10 \log(1 - |\Gamma|^2)$$

5. Dodatno povišanje konstante slabljenja zaradi neprilagoditve

Na neprilagojeni liniji z izgubami je prenašana delovna moč enaka razliki moči vpadnega in odbitega vala, izgubna moč pa je enaka vsoti izgubnih moči vpadnega in odbitega vala. Glede na zmanjšano vrednost delovne moči se izgube relativno povečajo. Dodatno povečanje konstante slabljenja $\Delta\alpha$ je tem večje, čim večji je SWR in konstanta slabljenja linije (glej diagram).

Izgube zaradi neprilagojenosti

12



(Mismatch loss chart)

Izgube zaradi neprilagojenosti pomenijo splošni primer slabljenja na prenosni liniji.

Primer:

Razmerje stojnega vala generatorja $S_g = 1,5$

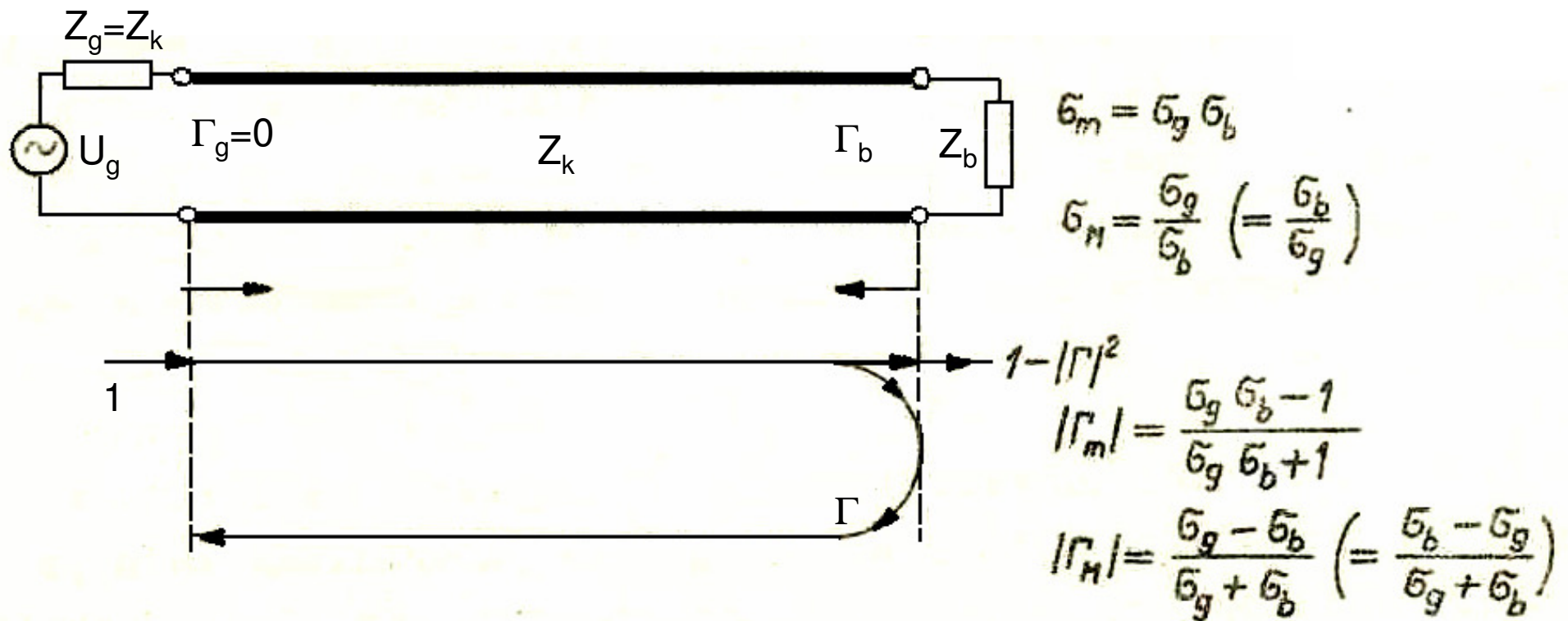
Razmerje stojnega vala bremena $S_b = 1,8$

Največje slabljenje
 $L_{\max} = 1 \text{ dB}$

Najmanjše slabljenje
 $L_{\min} = 0,035 \text{ dB}$

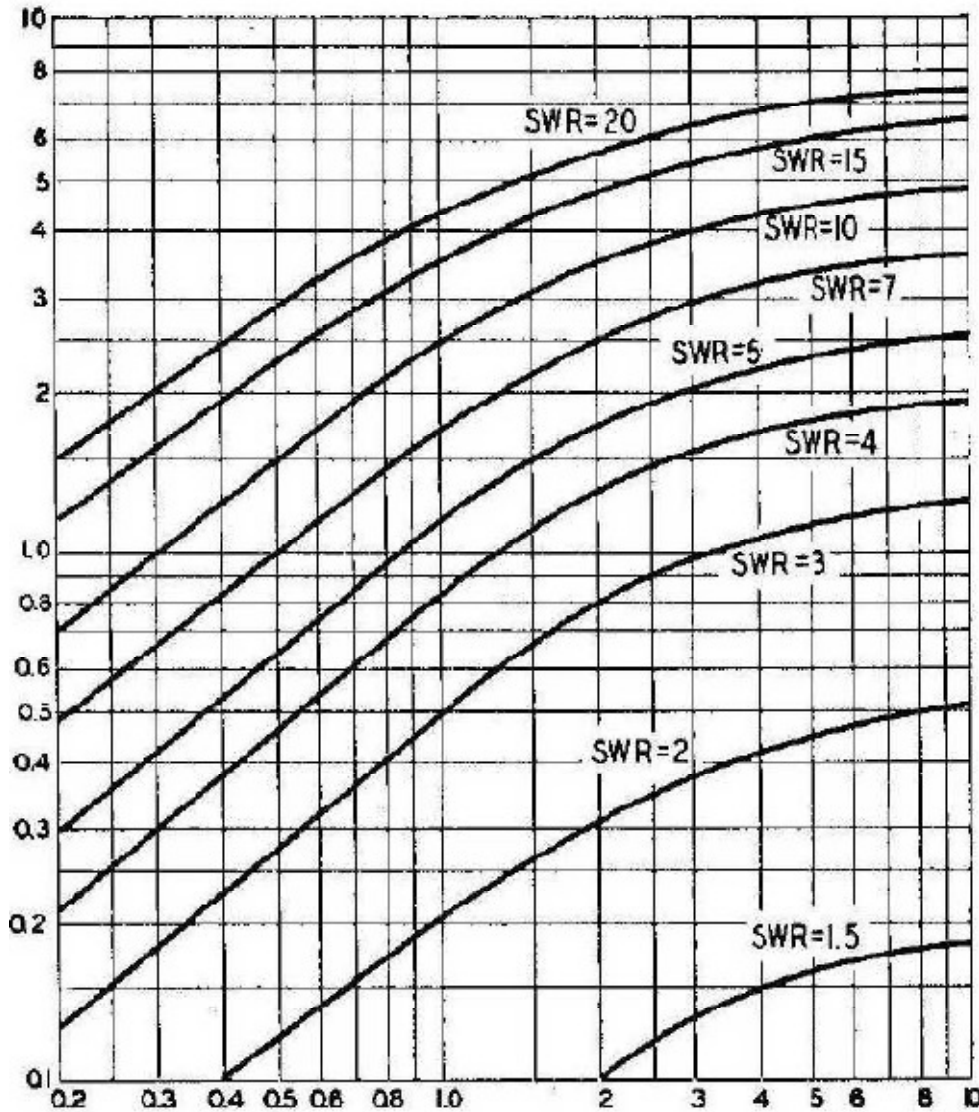
Ekvivalentna neprilagoditev bremena¹³

Na obeh straneh v splošnem neprilagojeno prenosno linijo lahko nadomestimo z linijo, ki je na generatorjevi strani prilagojena in je zaključena z ekvivalentnim bremenom. Na sliki je predstavljena ekvivalentna odbojnost bremena oz. razmerje stojnega vala za enak minimalni in maksimalni prenos moči.



Dodatne izgube zaradi neprilagoditve ¹⁴

Dodatne izgube ($\alpha_{ef} - \alpha$)L v dB zaradi neprilagoditve



Izgube αL v dB na prilagojeni liniji

$\alpha = - (1/P)dP/dz$ konstanta slabljenja potujočega vala oz. konstanta slabljenja prilagojenega voda

$\alpha_{dB} = 10 \log \alpha$ slabljenje v dB

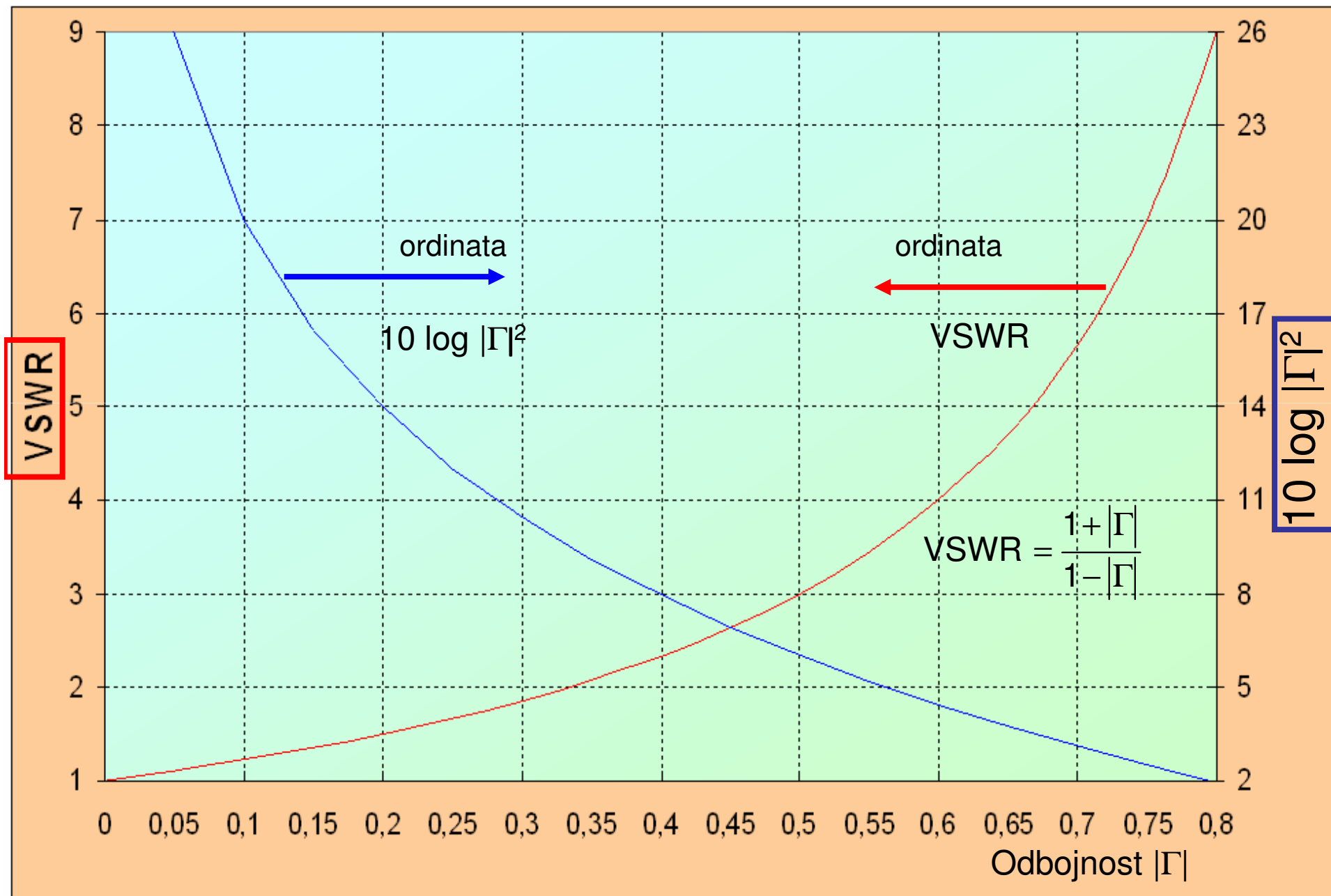
α_{ef} ...Efektivna (povišana) konstanta slabljenja zaradi dodatnih izgub na neprilagojenem vodu (stojni val)

$\Delta\alpha = \alpha_{ef} - \alpha$... razlika med konstanto slabljenja neprilagojenega in prilagojenega voda

$\Delta\alpha_{db} = 10 \log \Delta\alpha$, dodatne izgube v dB (ordinata na sliki) zaradi neprilagojenosti linije.

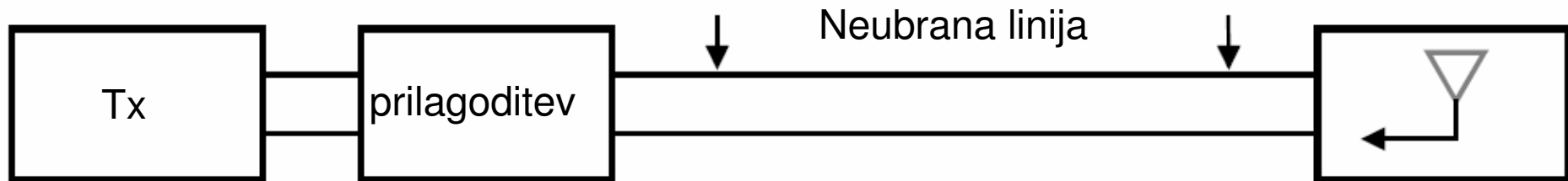
Primer: $\alpha L=3dB$, $S=2$, $\Delta\alpha L=0,37dB$

Neprilagojenost in odbojno slabljenje ¹⁵

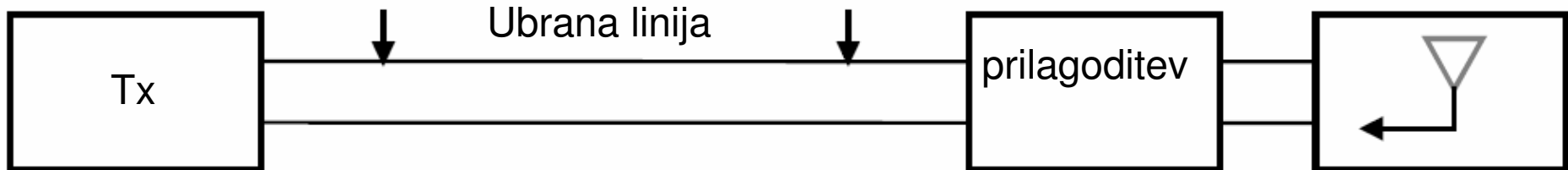


Mesto prilagajanja

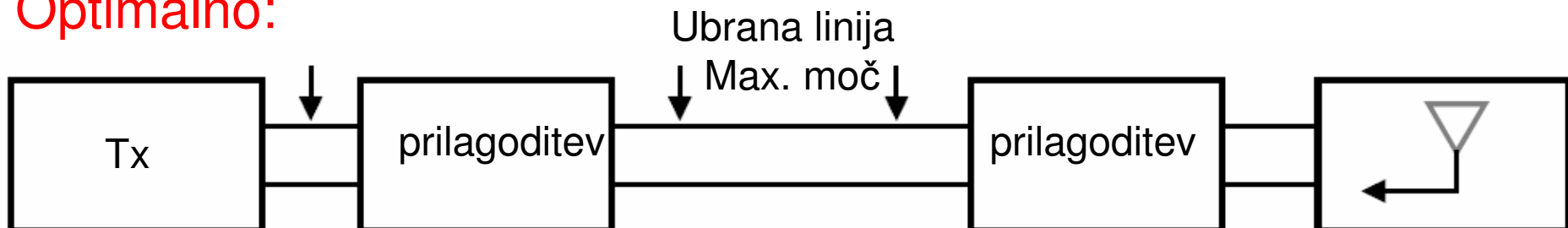
S prilagoditvijo bremena preprečimo nastanek stojnega vala in povečamo delovno moč na liniji. Z dodatno prilagoditvijo (če je potrebna) oddajnika omogočimo optimalno izkoriščanje razpoložljive moči.



Dobro

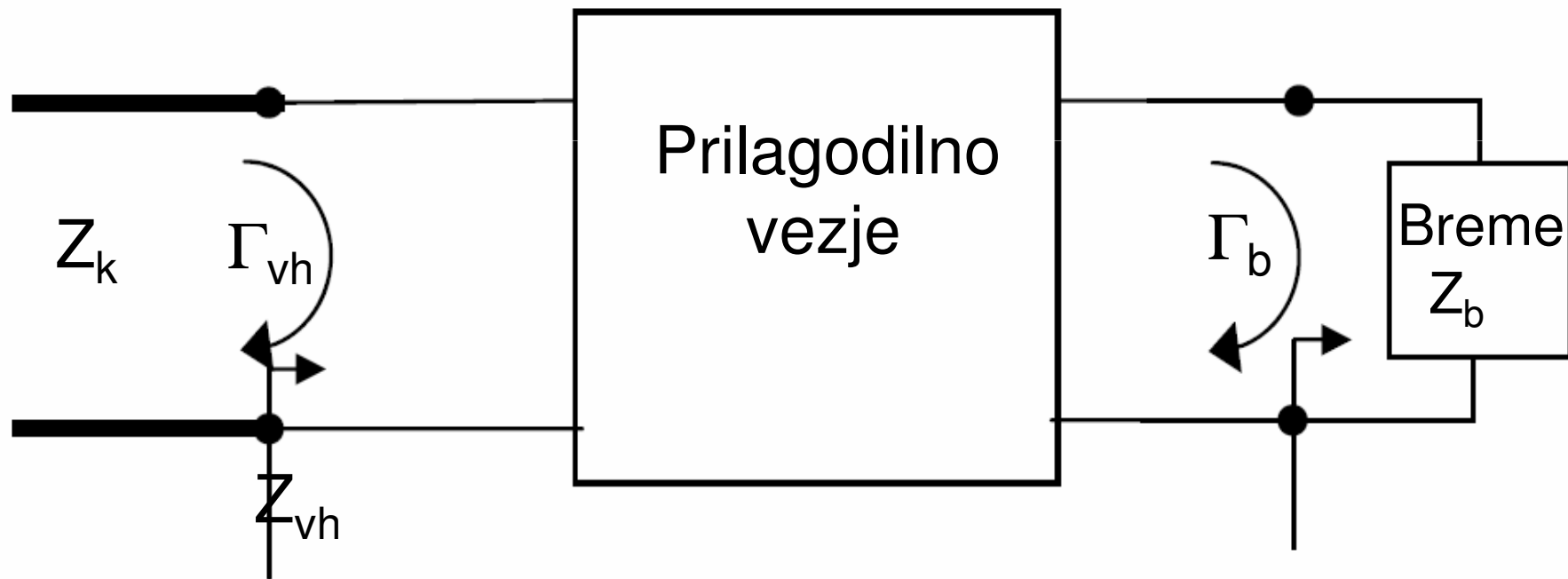


Optimalno:



Prilagodilna vezja

- L-C člen
- Dvojna ubiralka
- Linijski odsek kot transformator
- Večstopenjski transformator
- Enojna ubiralka
- Zvezni transformator

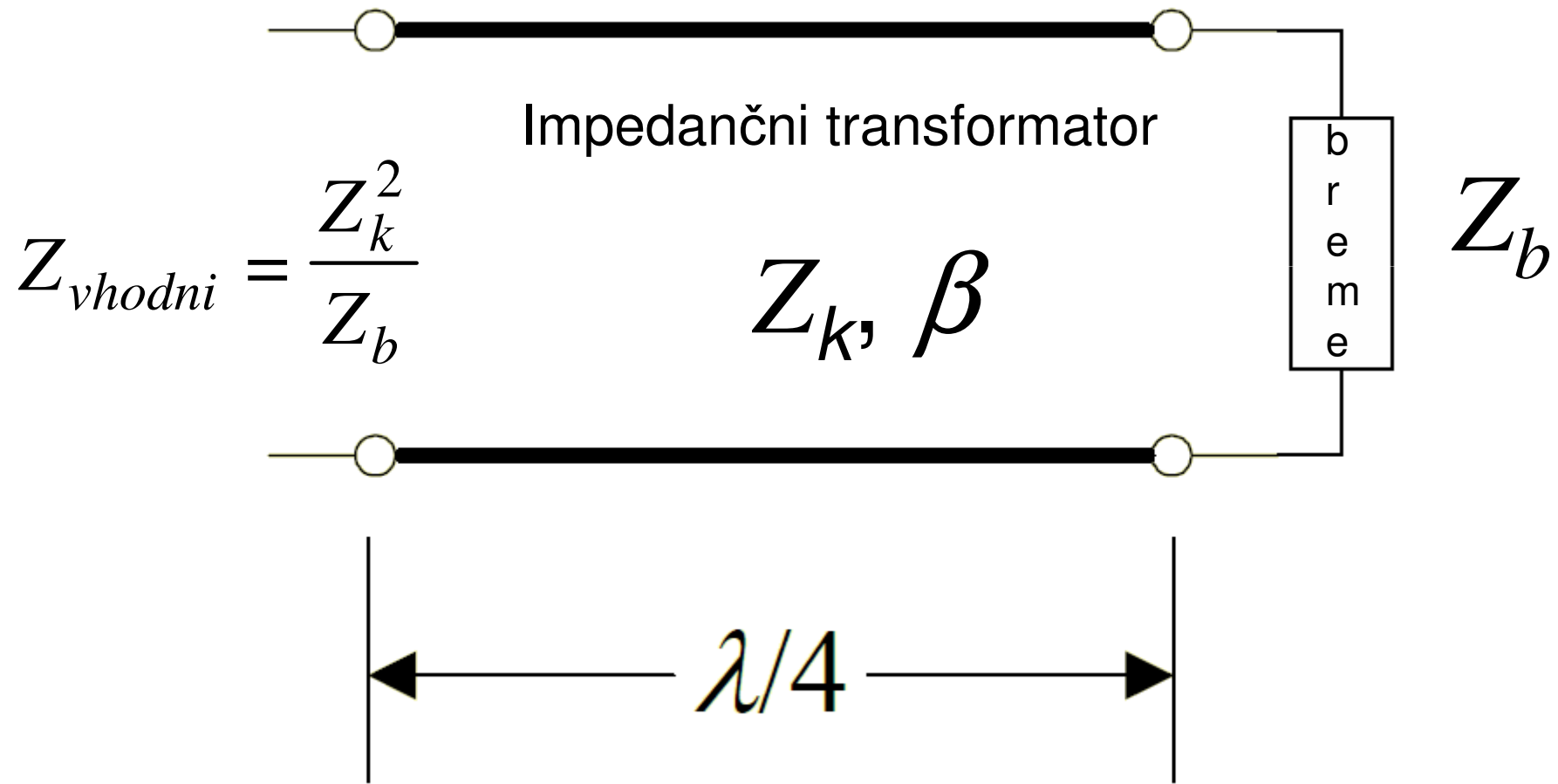


$$\Gamma_{vh} = 0, \text{ min.}$$

$$Z_{vh} = Z_k$$

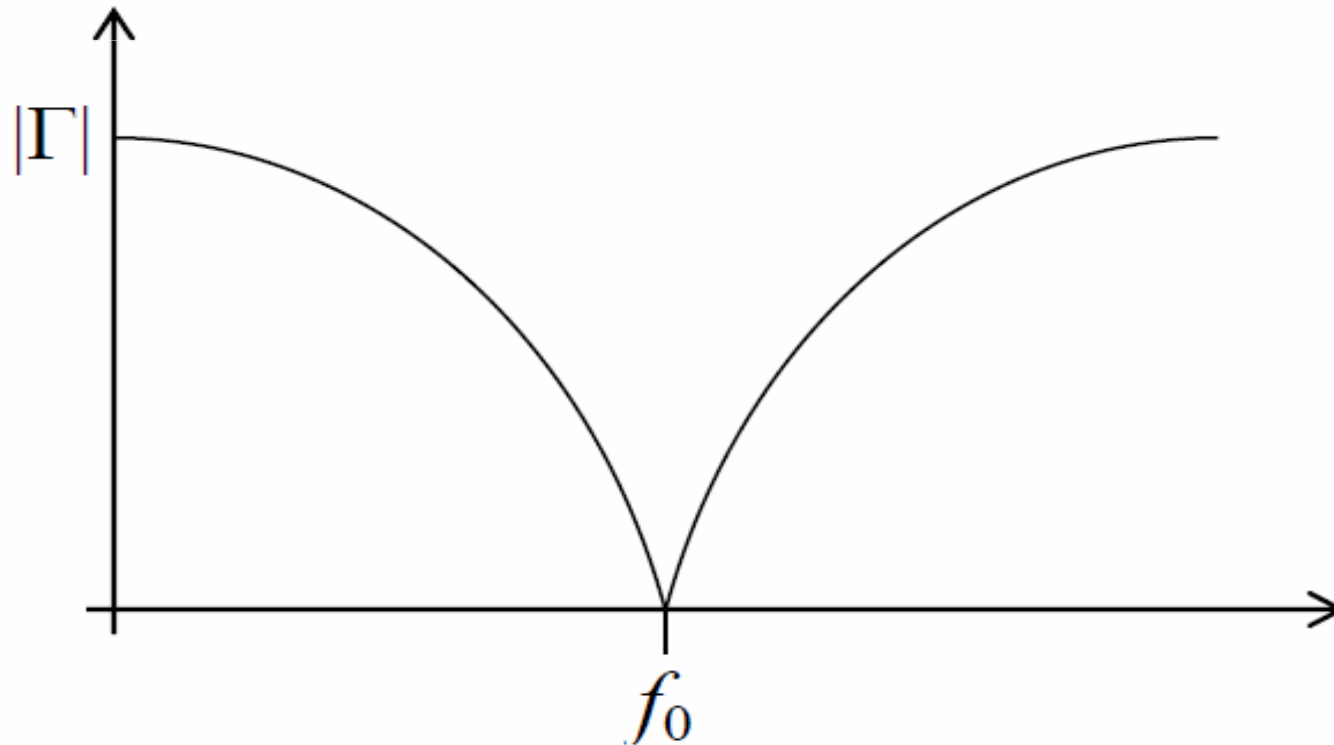
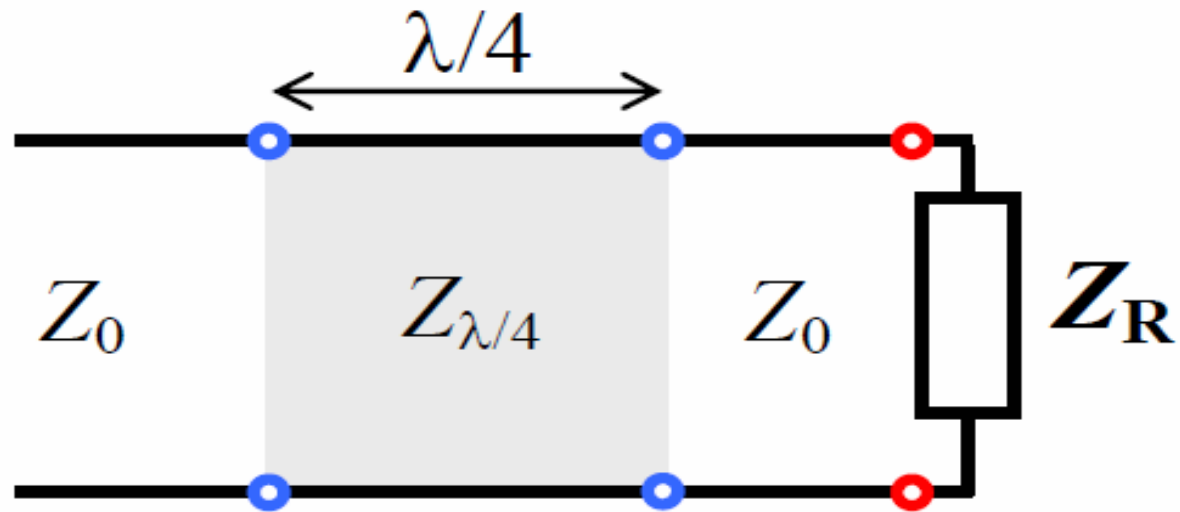
Impedančni linijski transformator

- ozkopasovna impedančna transformacija

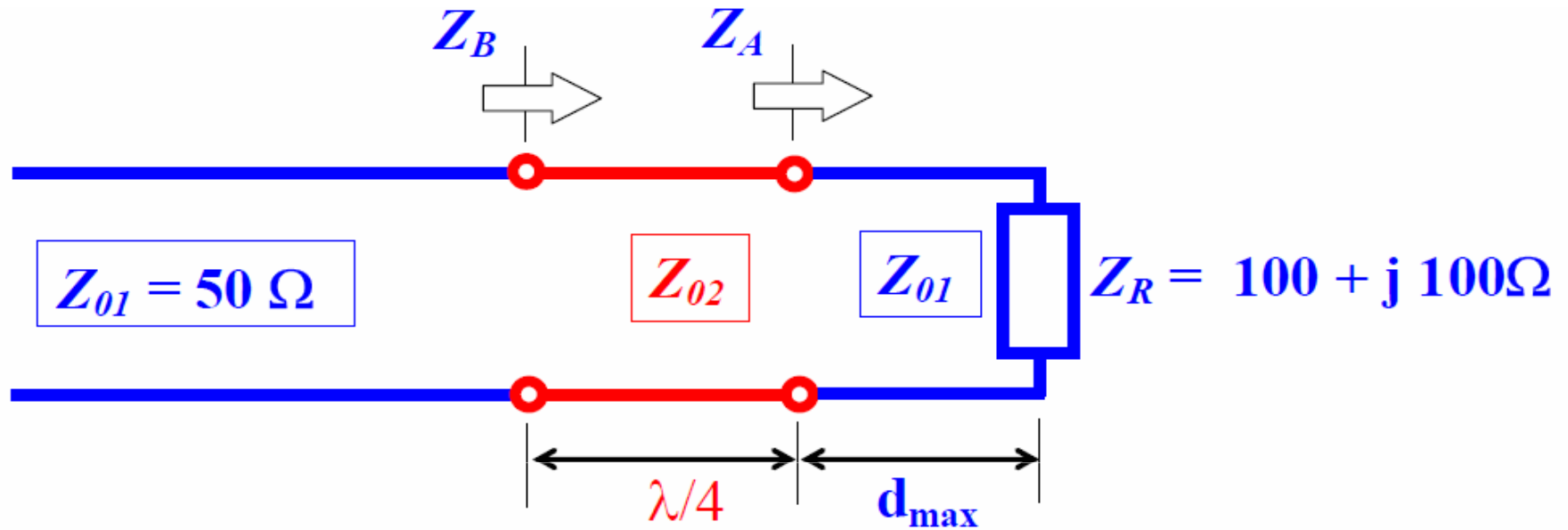


Frekvenčni pas transformacije

19



Prilagoditev s transformatorjem

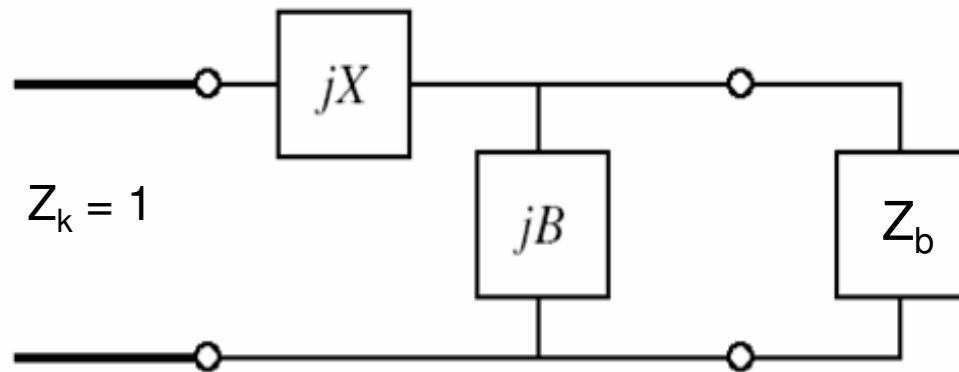


$$|\Gamma_R| = \left| \frac{100 + j100 - 50}{100 + j100 + 50} \right| \approx 0.62$$

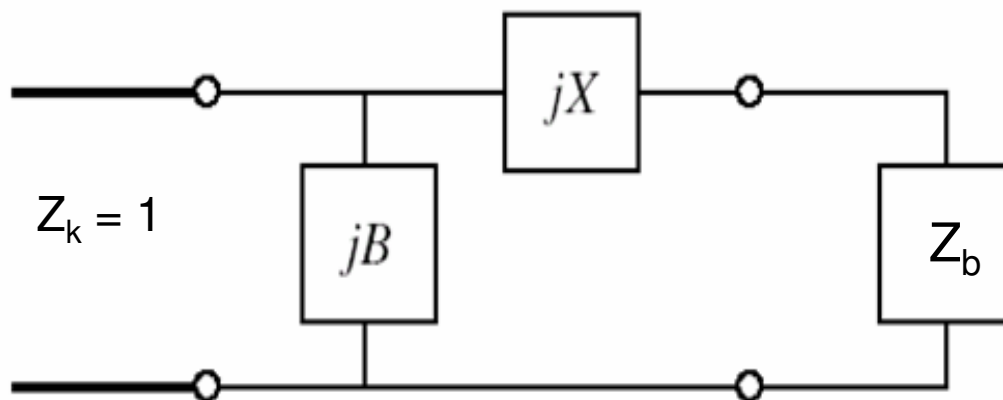
$$Z_A = Z_0 \frac{1 + |\Gamma_R|}{1 - |\Gamma_R|} \approx 213.28 \Omega$$

$$Z_{02} = \sqrt{Z_{01} Z_A} = \sqrt{50 \cdot 213.28} = 103.27 \Omega$$

Prilagodilna reaktivna polcelica L

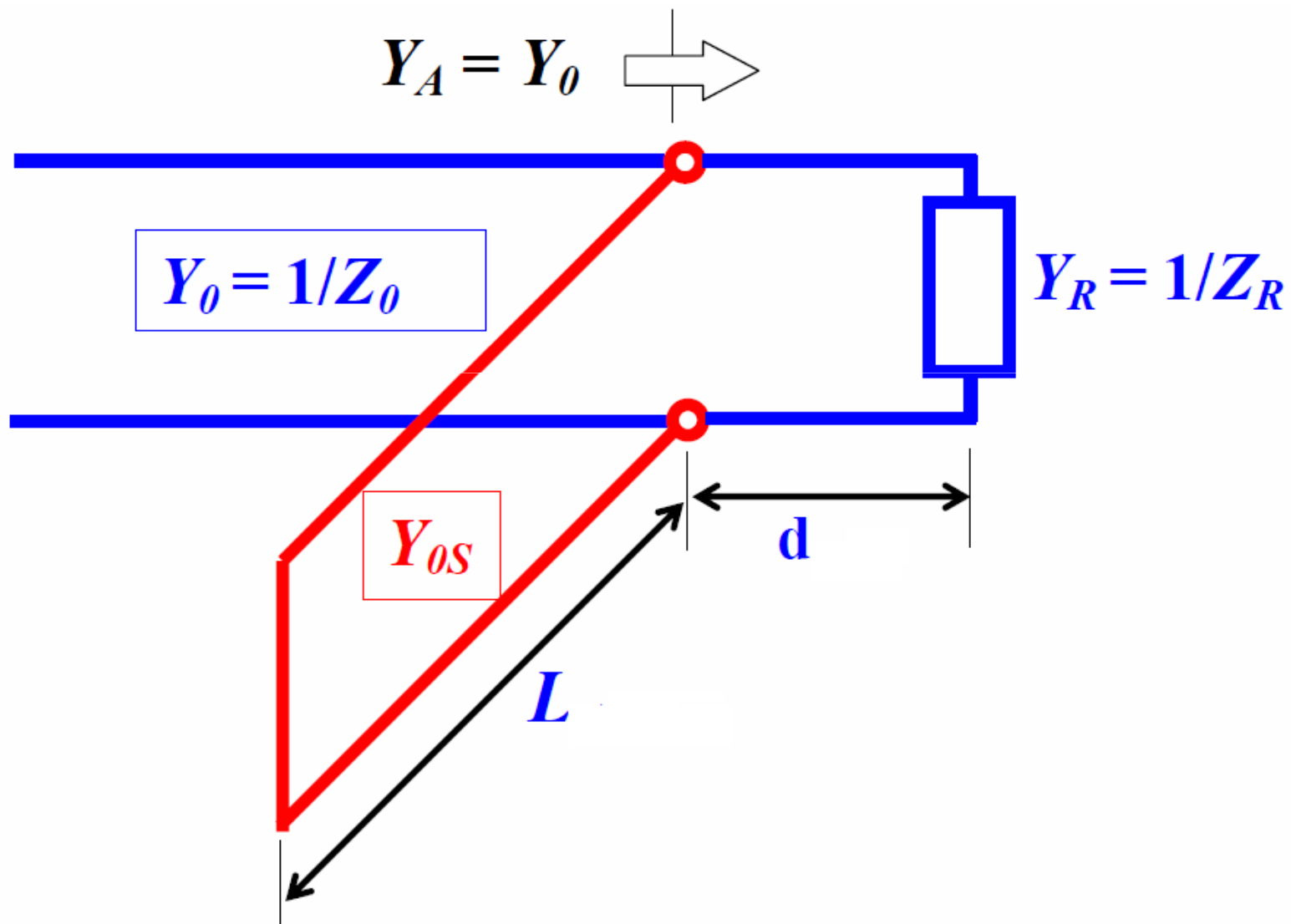


Prilagoditev impedance Z_b
v notranjosti kroga $1 + jX$

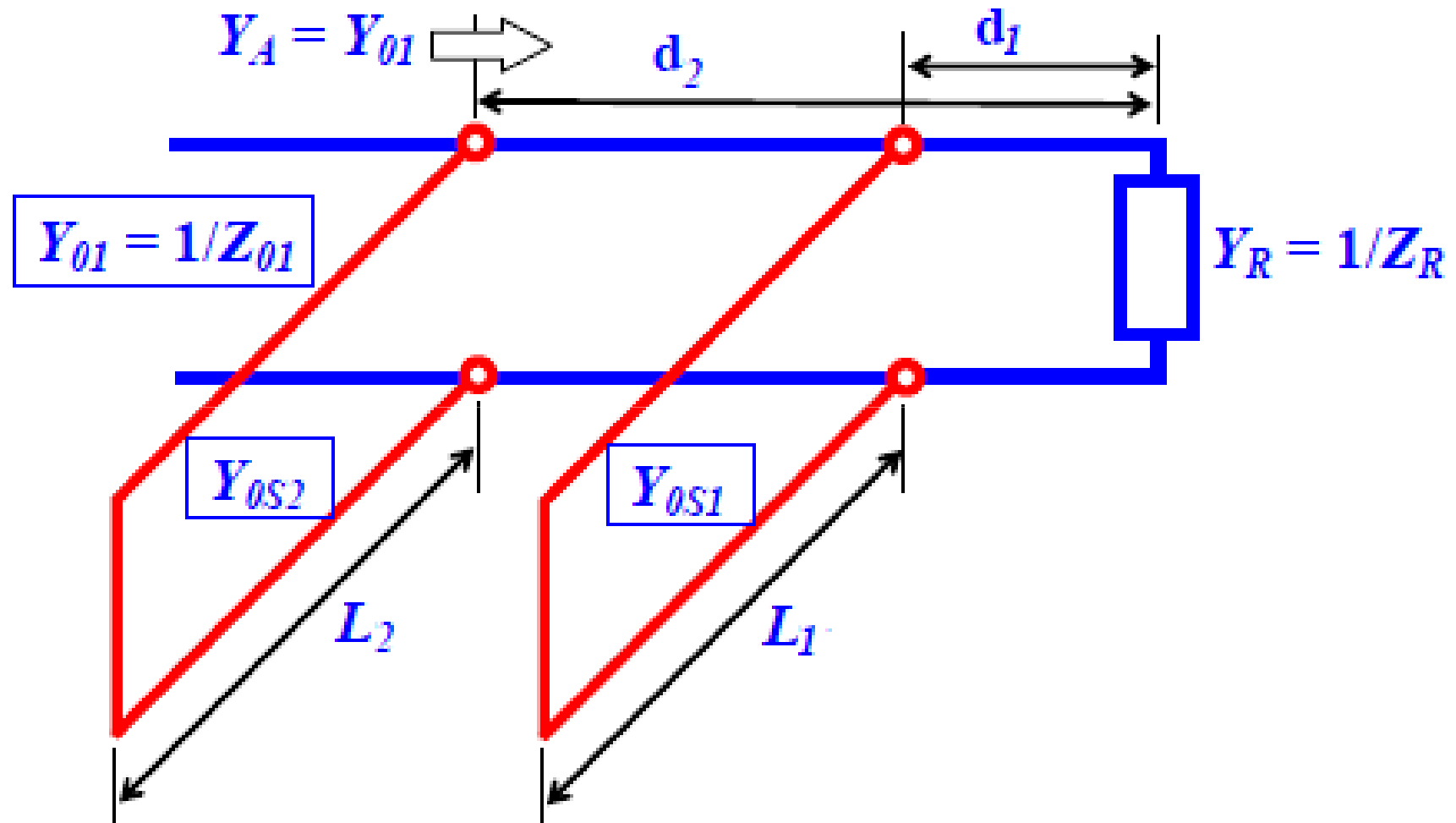


Prilagoditev impedance Z_b
v zunanosti kroga $1 + jX$

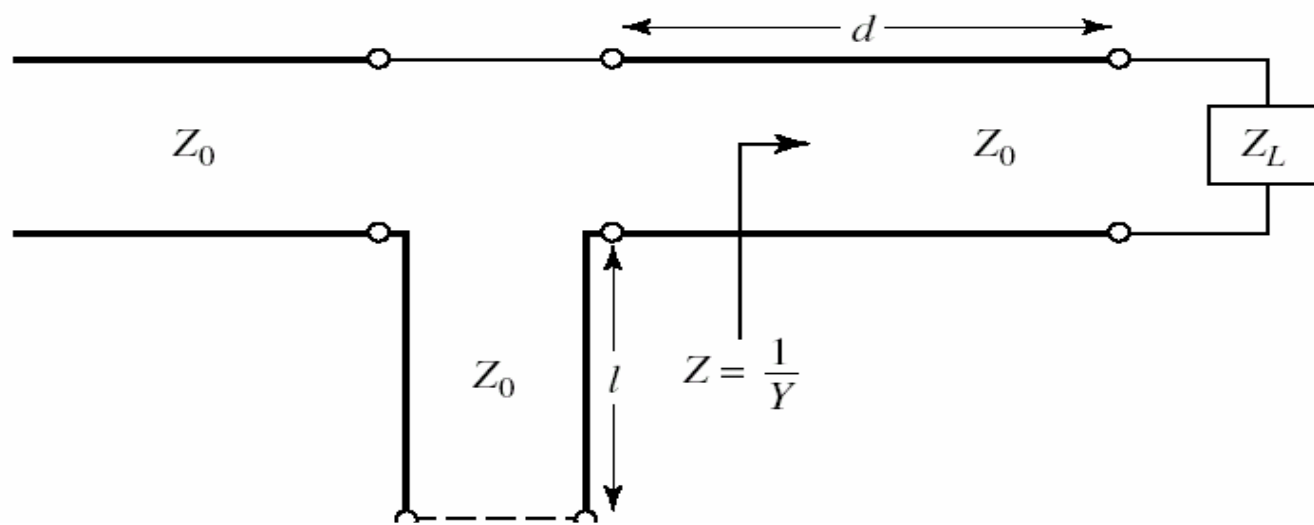
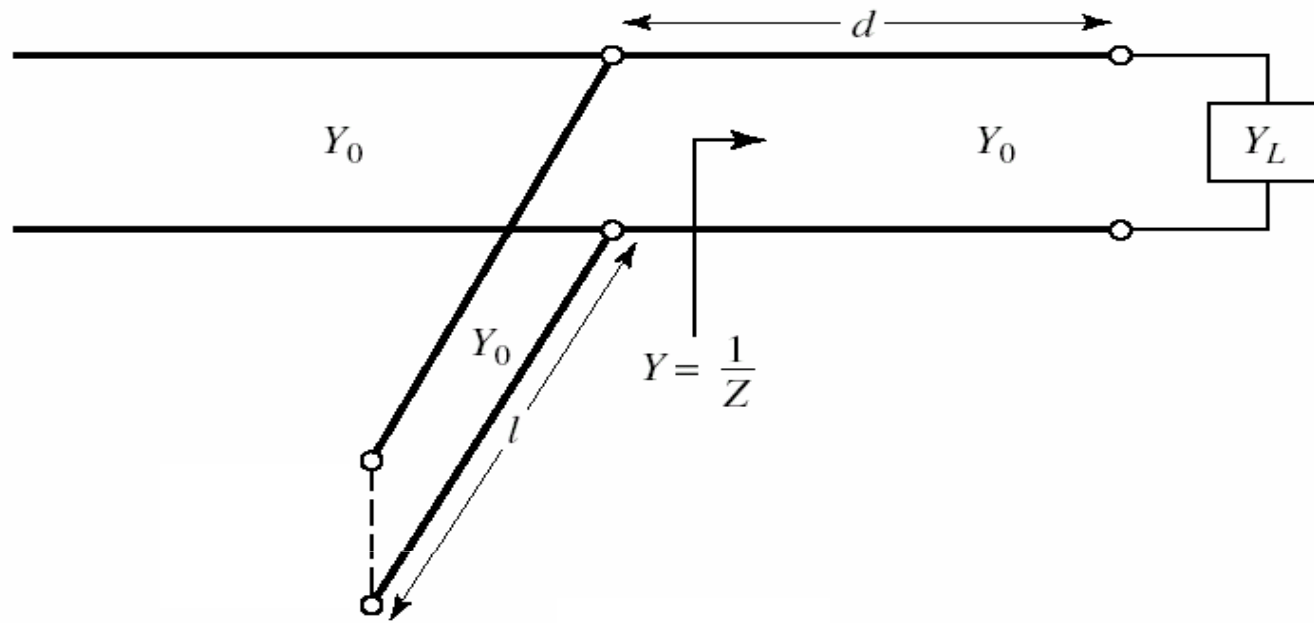
Linijska ubiralka



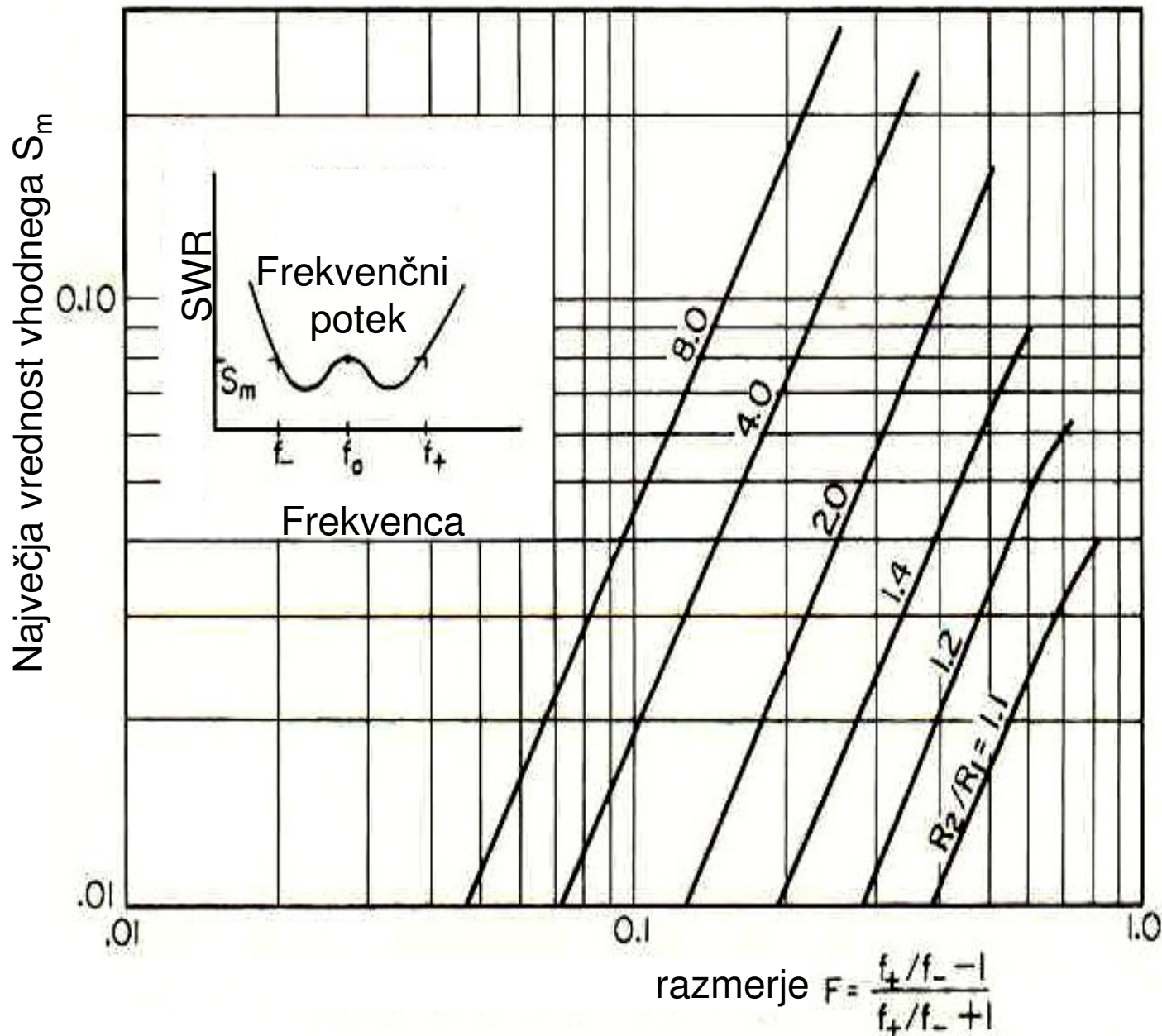
Dvojna linijska ubiralka



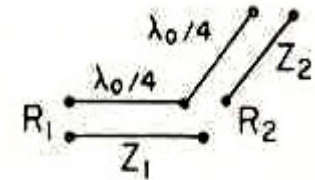
Vzporedna in zaporedna ubiralka



Ubiranje z zaporedno in vzporedno ubiralko²⁵



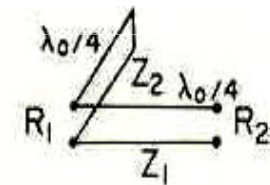
Zaporedna ubiralka:



$$Z_1 = \sqrt{R_1 R_2 S_m}$$

$$Z_2 = Z_1 \left(\frac{R_2}{S_m R_1} - 1 \right)$$

Vzporedna ubiralka:



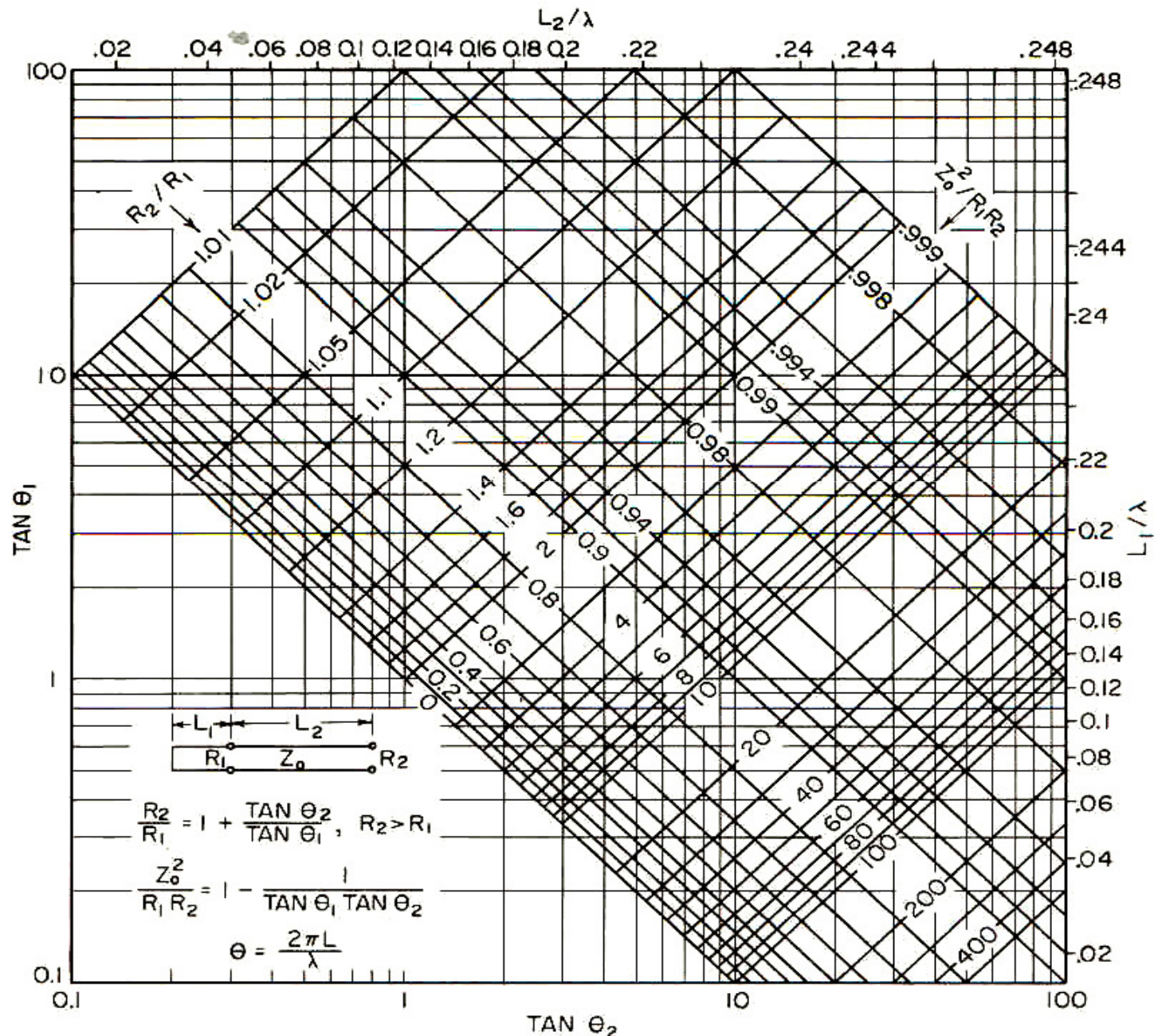
$$Z_1 = \sqrt{R_1 R_2 / S_m}, \quad R_2 > R_1$$

$$Z_2 = Z_1 / \left(\frac{R_2}{S_m R_1} - 1 \right)$$

Širina pasu (zap. in vzp.):

$$\cos[\pi(1-F)] = \frac{2S_m \frac{R_2}{R_1} - \frac{1}{S_m}}{\frac{R_2}{R_1} - \frac{1}{S_m}}$$

Prilagajanje s transformatorjem in ubiralcko

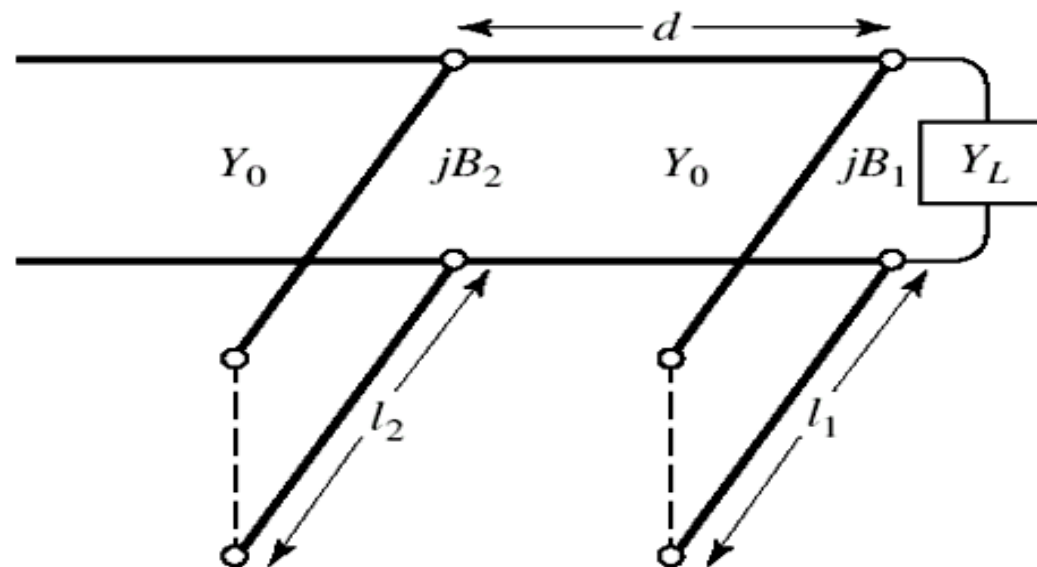
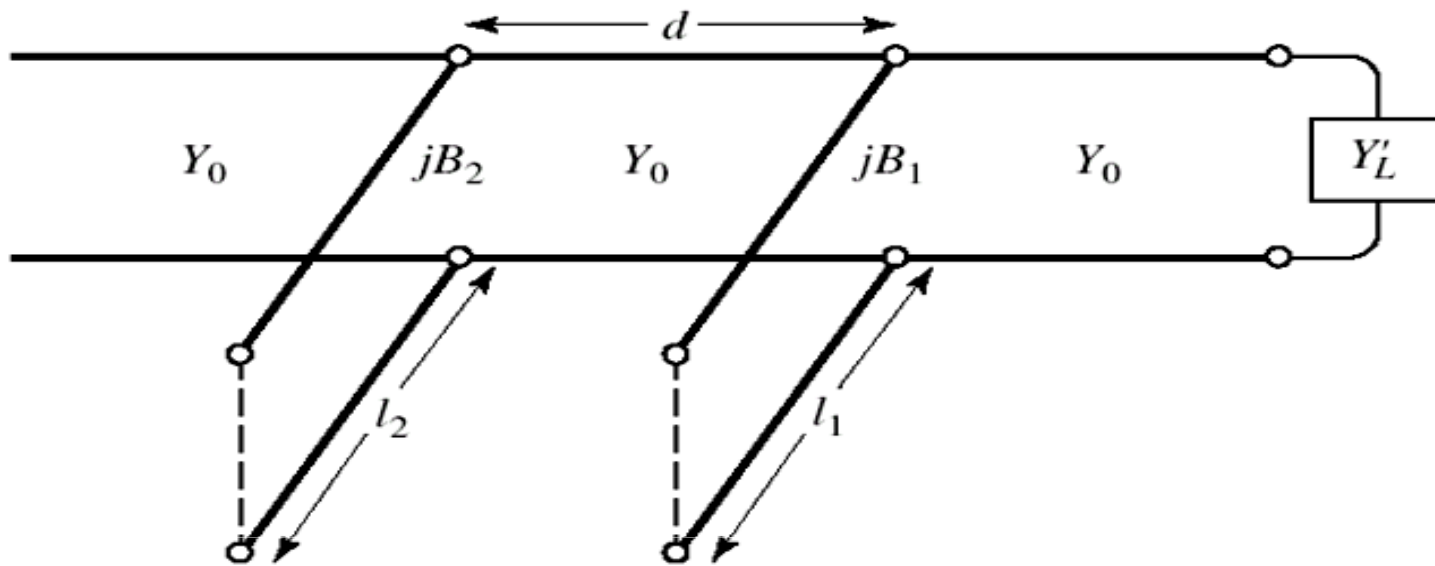


Dano:
 R_1, R_2, Z_k

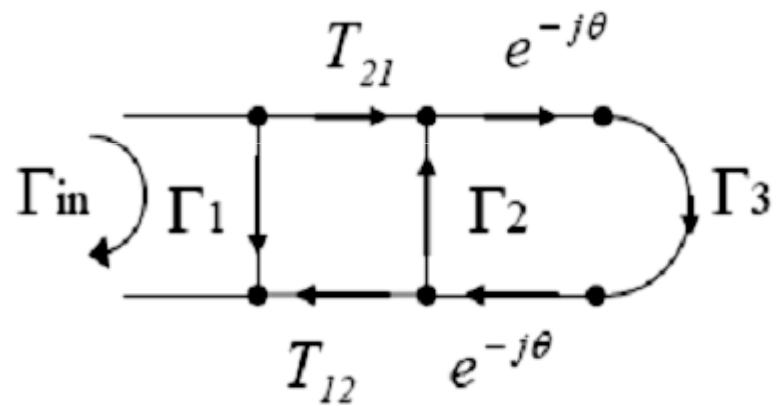
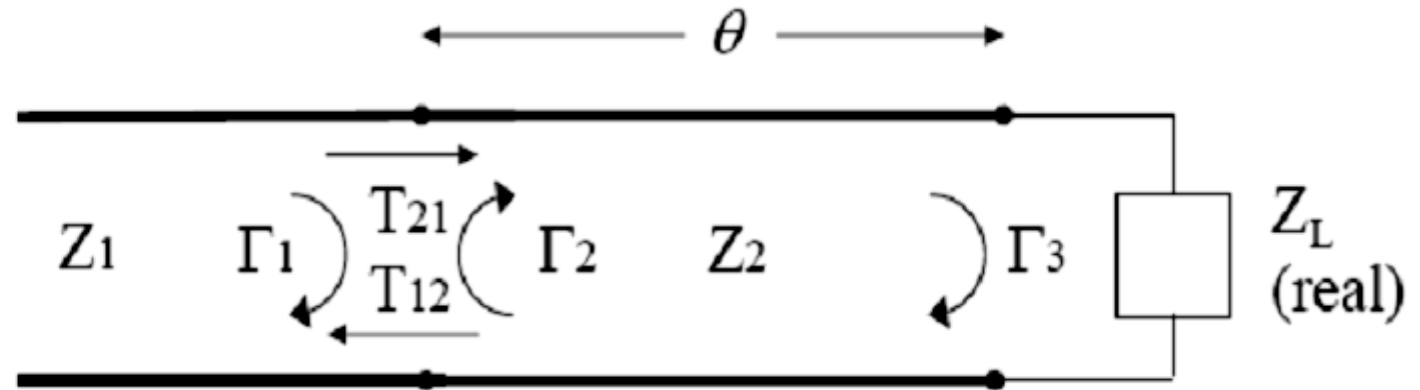
- določimo sečišče v poševni mreži
- določimo vrednost na abscisi in ordinati
- določimo L_1 in L_2

Dvojna vzporedna ubiralka

27



Aproksimacije pri majhnih odbojih



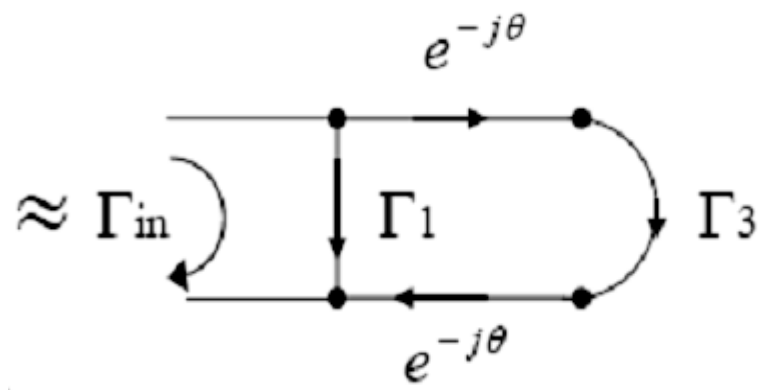
$$\Gamma_2 = -\Gamma_1, \quad T_{21} = 1 + \Gamma_1, \quad T_{12} = 1 + \Gamma_2$$

$$\Gamma_{in} = \Gamma_1 + \frac{T_{12} T_{21} \Gamma_3 e^{-j2\theta}}{1 - \Gamma_2 \Gamma_3 e^{-j2\theta}}$$

$$= \frac{\Gamma_1 + \Gamma_1^2 \Gamma_3 e^{-j2\theta} + (1 - \Gamma_1)(1 + \Gamma_1) \Gamma_3 e^{-j2\theta}}{1 + \Gamma_1 \Gamma_3 e^{-j2\theta}}$$

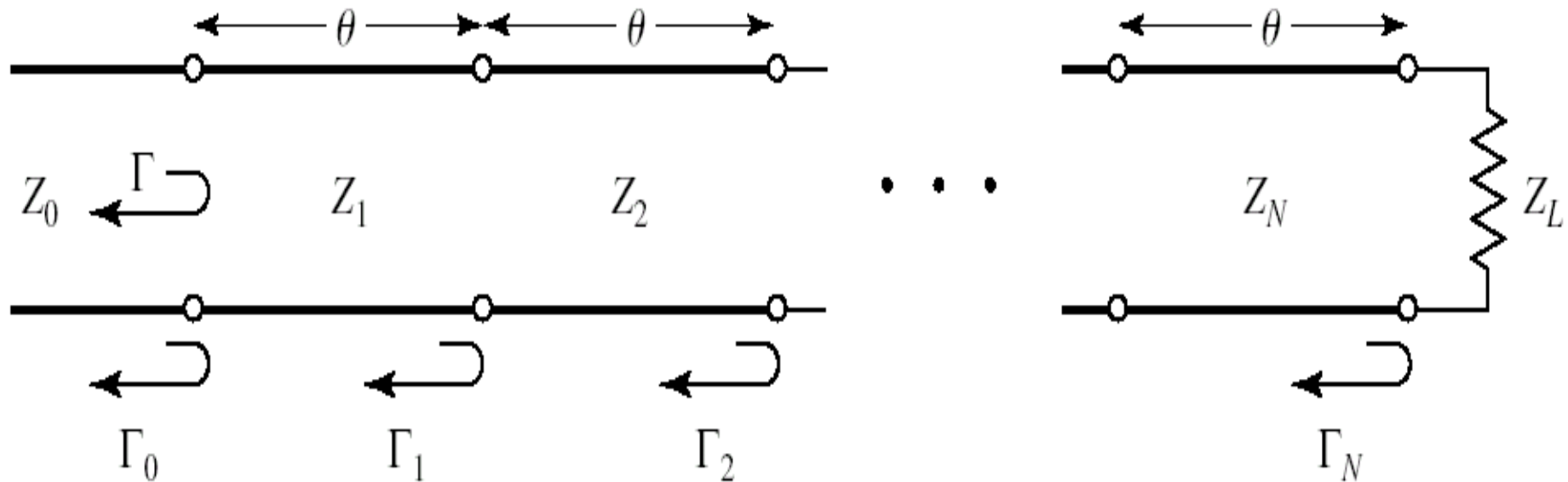
$$= \frac{\Gamma_1 + \Gamma_3 e^{-j2\theta}}{1 + \Gamma_1 \Gamma_3 e^{-j2\theta}}$$

$$\approx \Gamma_1 + \Gamma_3 e^{-j2\theta} \quad \text{if } Z_1 \approx Z_2 \approx Z_L$$



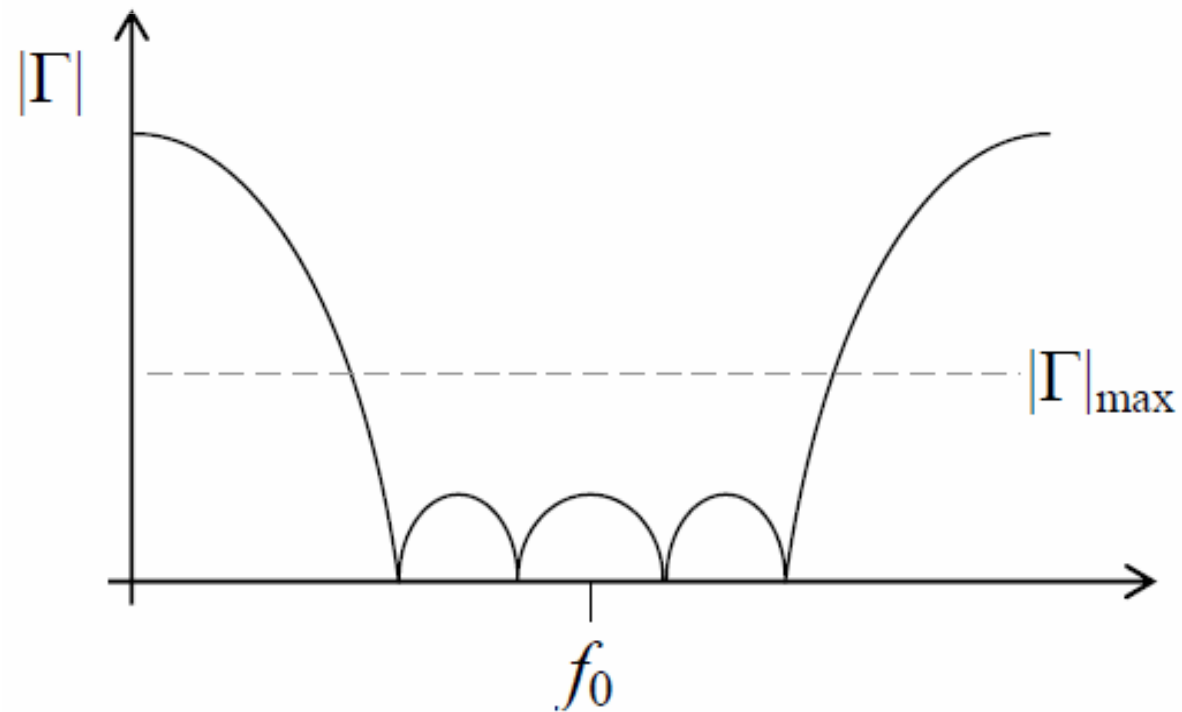
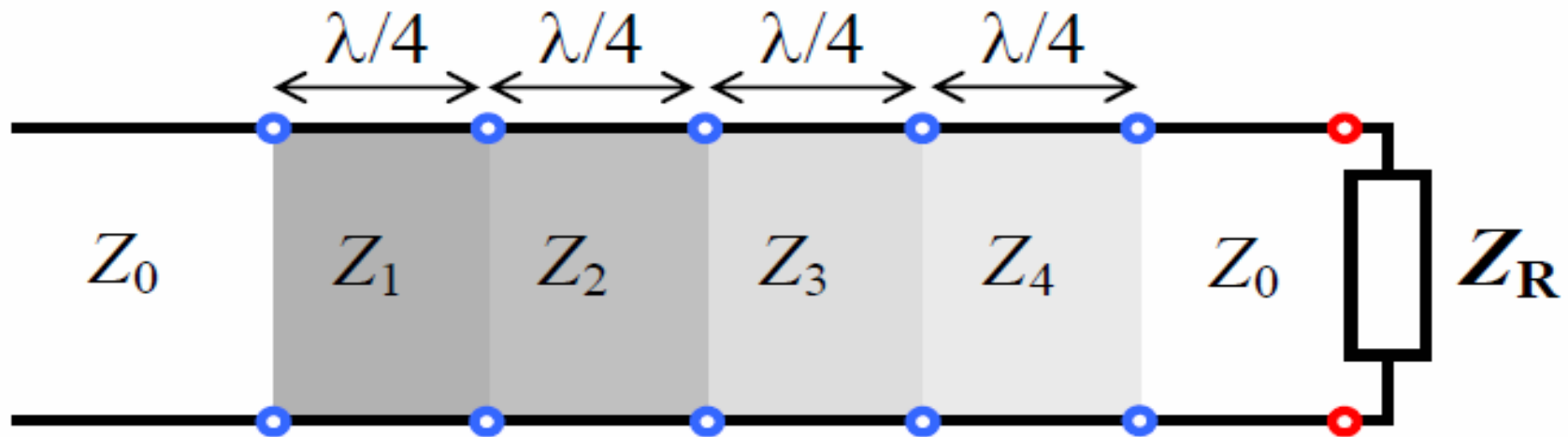
Predpostavka malih odbojnosti

- Majhni preskoki karakteristične impedance med stopnjami
 $\Delta Z_k / Z_k \ll 1$
- Odbojnosti med stopnjami večstopenjskega transformatorja so majhne
- Upoštevamo odbojnosti prvega reda in zanemarimo odbojnosti drugega in višjega reda
- Rezultat je pregleden in točnost ponavadi zadostna.



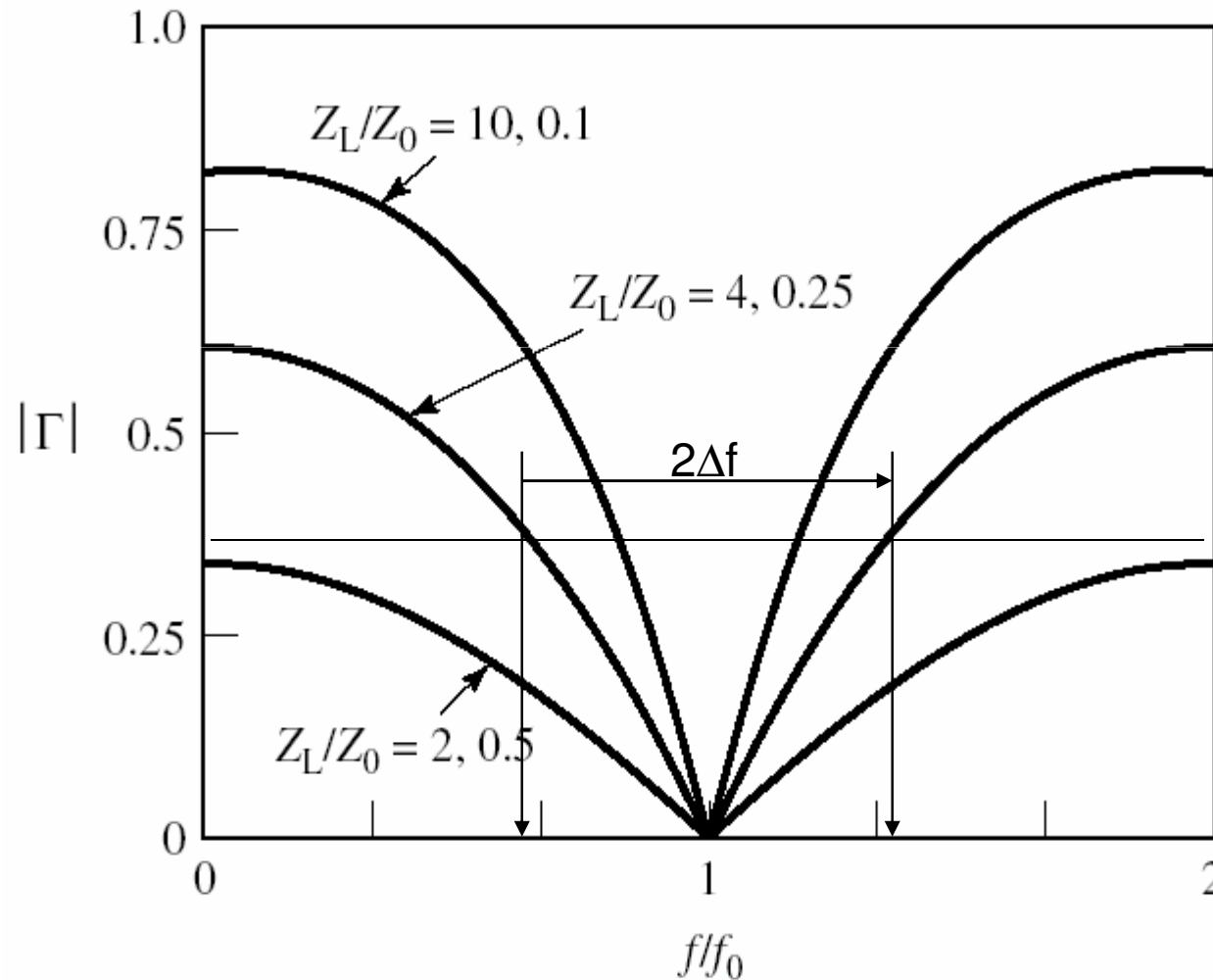
Večstopenjski transformator

30



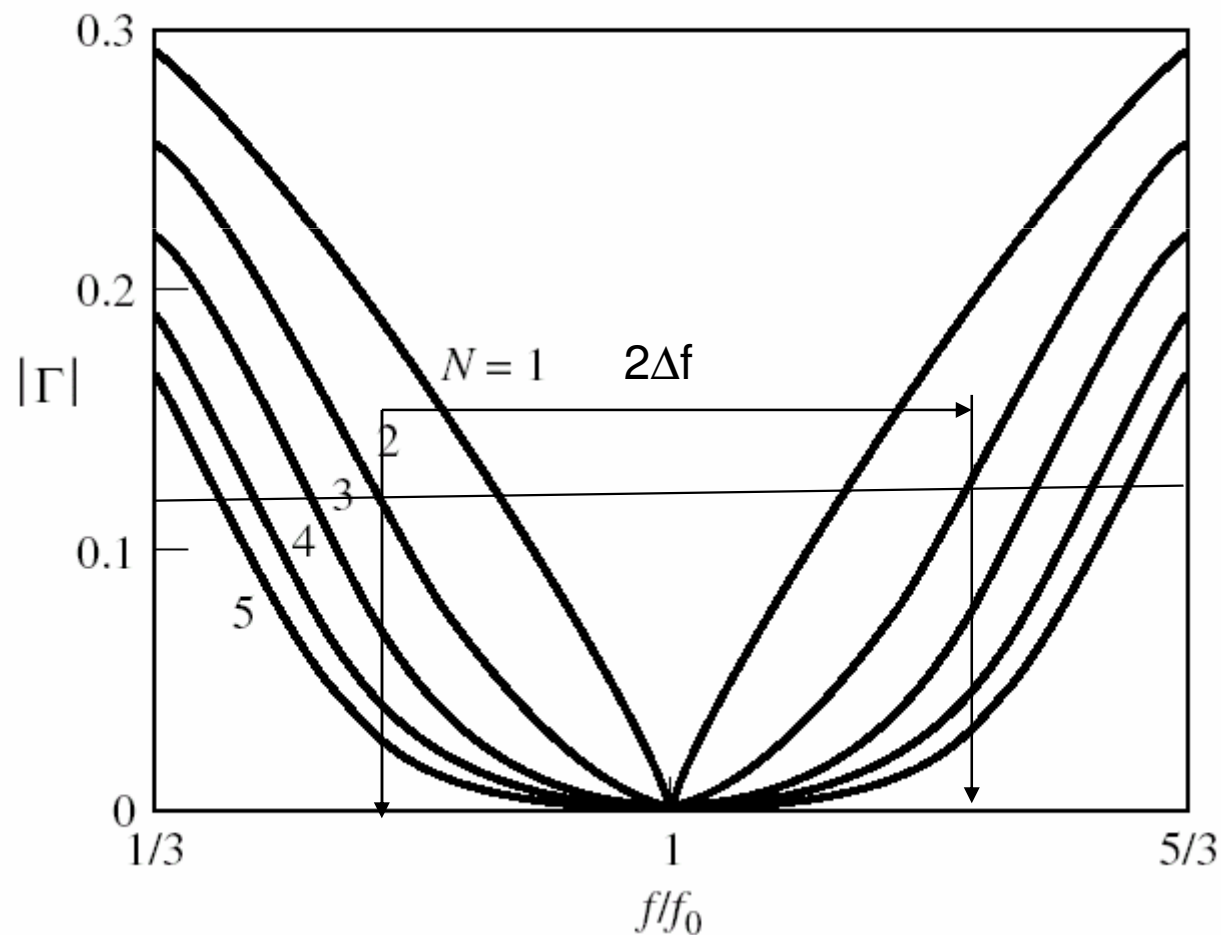
Transformacijsko razmerje in širina pasu ³¹

- Transformacijsko razmerje Z_L/Z_0
- Pasovna širina $2\Delta f$



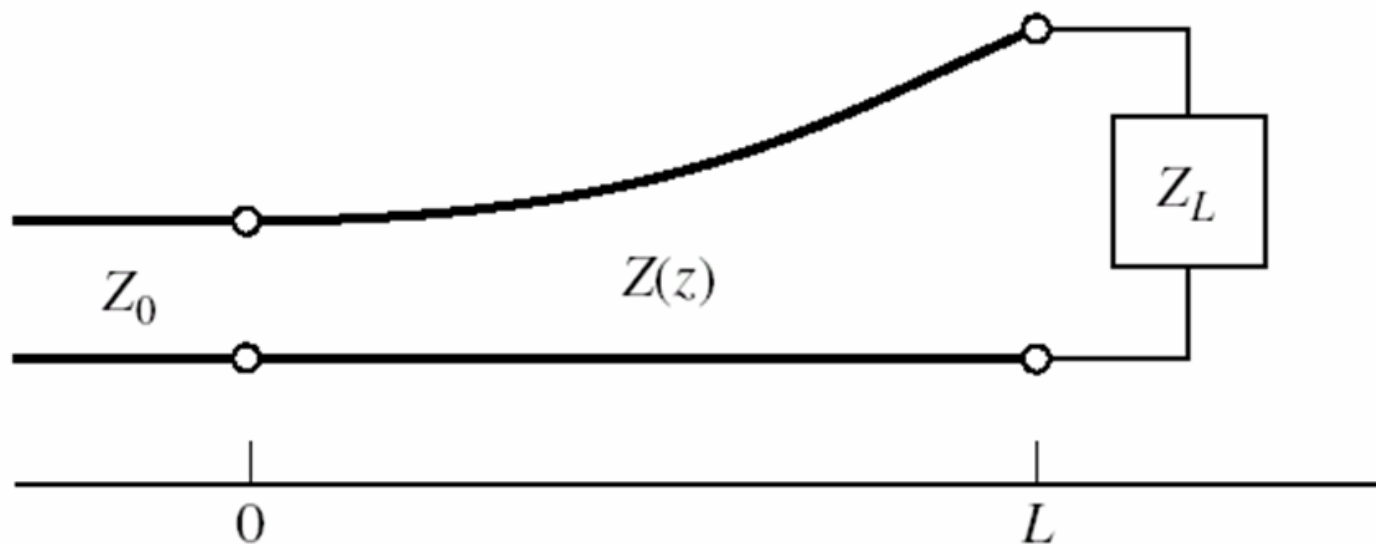
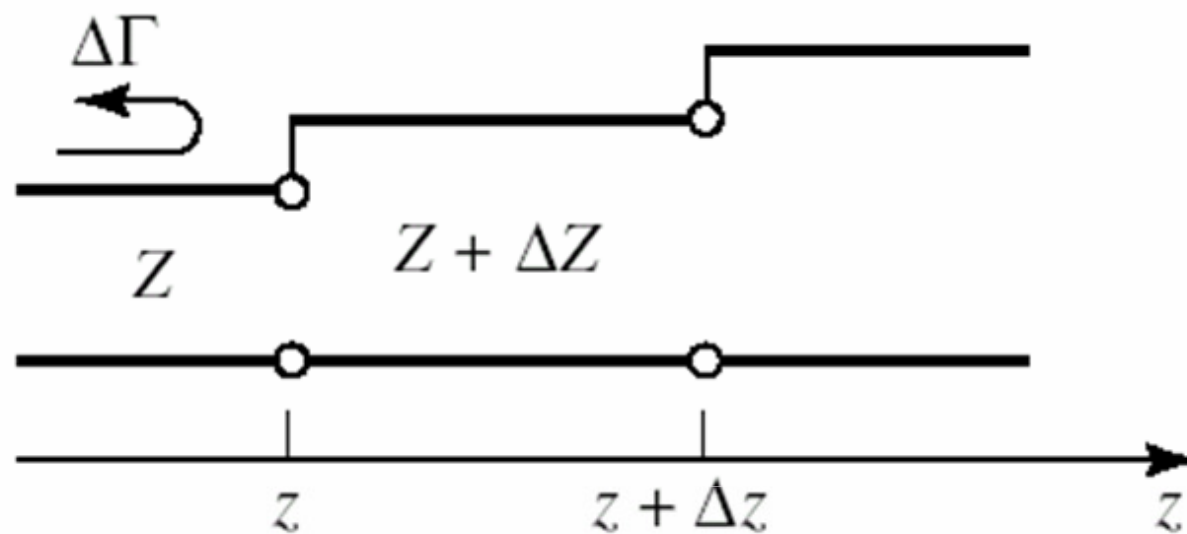
Širokopasovni transformator

- N – sekcijski binomski transformator:
 Odbojnosti med posameznimi odseki so sorazmerne binomskim koeficientom.



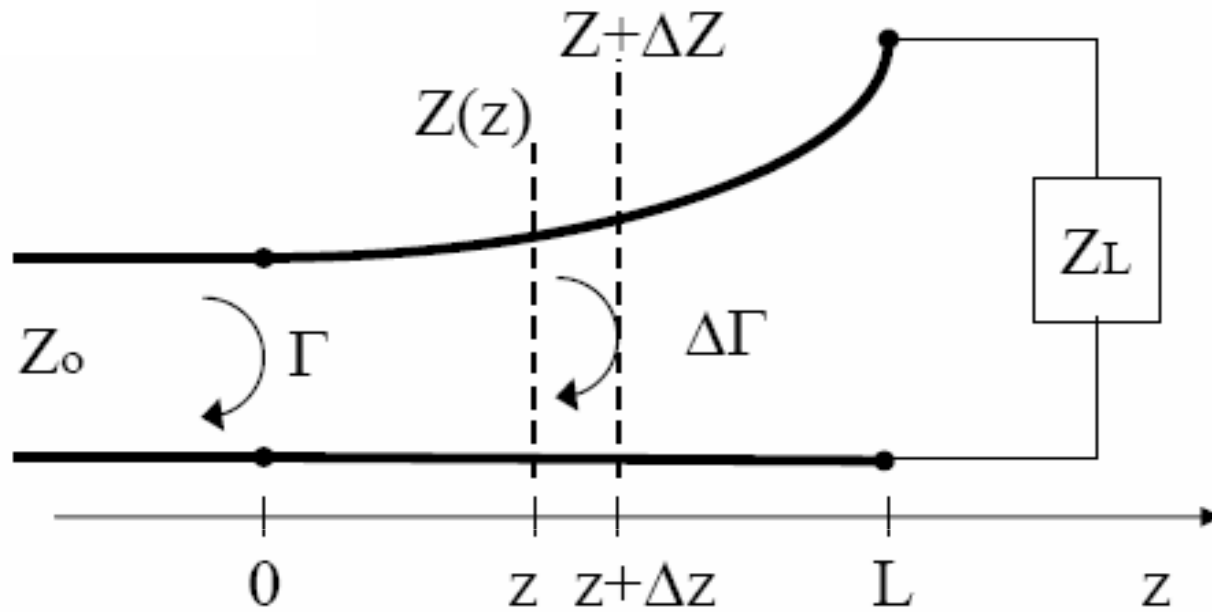
Diskretni in zvezni transformator

33



Zvezni linijski transformator

34



$$\Delta\Gamma = \frac{Z + \Delta Z - Z}{Z + \Delta Z + Z} \approx \frac{\Delta Z}{2Z}$$

$$\rightarrow d\Gamma = \frac{1}{2} \frac{dZ}{Z} = \frac{1}{2} \frac{d \ln Z/Z_0}{dz} dz$$

$$\rightarrow \Gamma(\theta) = \frac{1}{2} \int_0^L e^{-j2\beta z} \frac{d}{dz} \left(\ln \frac{Z}{Z_0} \right) dz$$

EkspONENTNI IN TRIKOTNI TRANSFORMATOR ³⁵

- EkspONENTNO RASTOČA KARAKTERISTIČNA IMPEDANCA NA ODSEKU OD $z = 0$ DO L :

$$Z(z) = Z_o e^{az} \quad 0 < z < L$$

$$Z(L) = Z_L = Z_o e^{aL} \rightarrow a = \frac{1}{L} \ln \frac{Z_L}{Z_o}$$

$$\rightarrow \Gamma(\theta) = \frac{1}{2} \int_0^L e^{-j2\beta z} \frac{d}{dz} (\ln e^{az}) dz = \frac{1}{2} \ln \frac{Z_L}{Z_o} e^{-j\beta L} \frac{\sin \beta L}{\beta L}$$

$$L \uparrow, \Gamma(\theta) \downarrow$$

- KARAKTERISTIČNA IMPEDANCA EKSPONENTNO RASTOČA OD OD $z = 0$ DO $L/2$ IN EKSPONENTNO UPADAJOČA OD $z = L/2$ DO L :

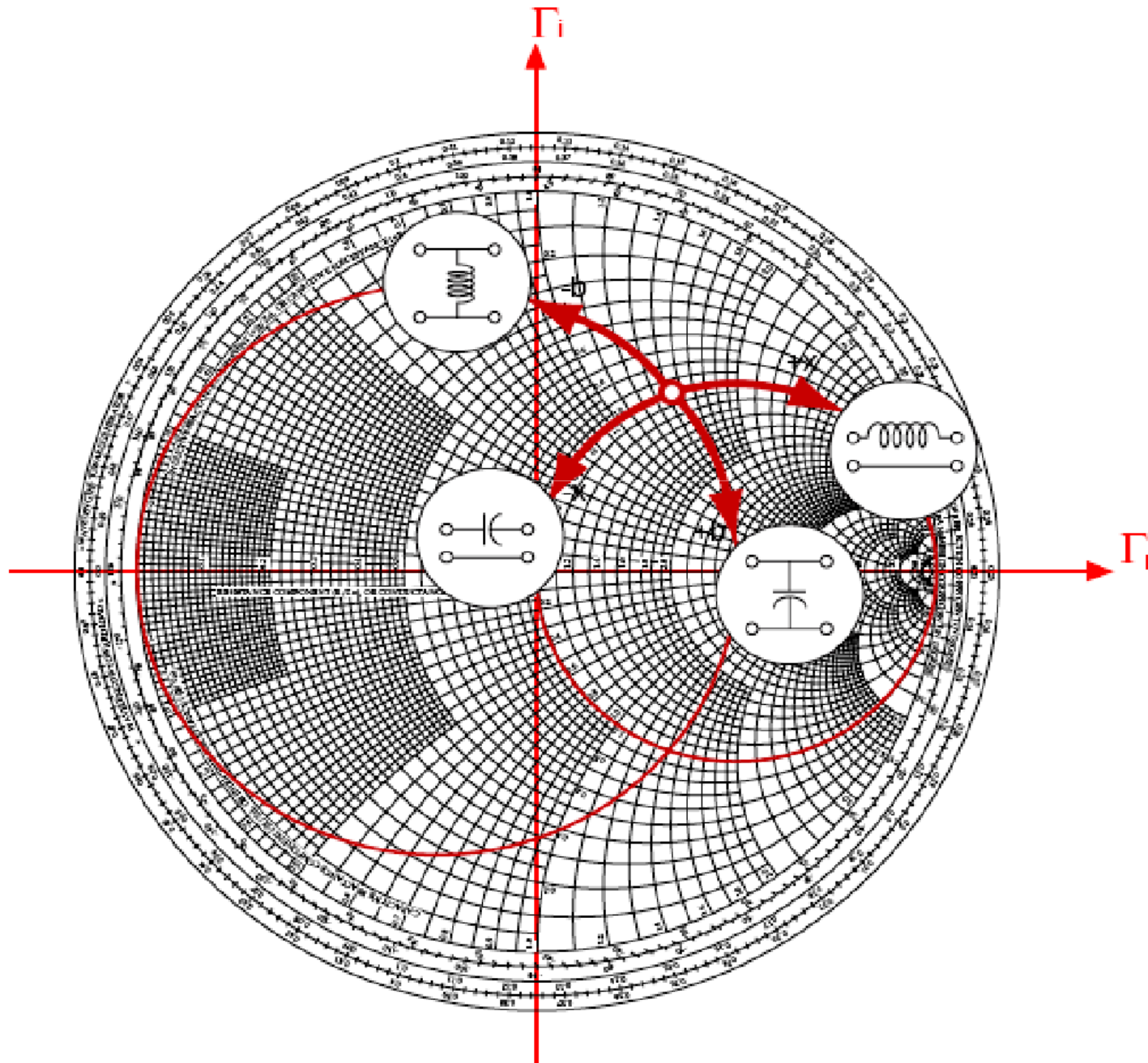
$$Z(z) = \begin{cases} Z_o e^{2(z/L)^2 \ln Z_L/Z_o} & 0 < z < L/2 \\ Z_o e^{(4z/L - 2z^2/L^2 - 1)^2 \ln Z_L/Z_o} & L/2 < z < L \end{cases}$$

$$\Gamma(\theta) = \frac{1}{2} \ln \frac{Z_L}{Z_o} e^{-j\beta L} \left[\frac{\sin(\beta L/2)}{\beta L/2} \right]^2$$

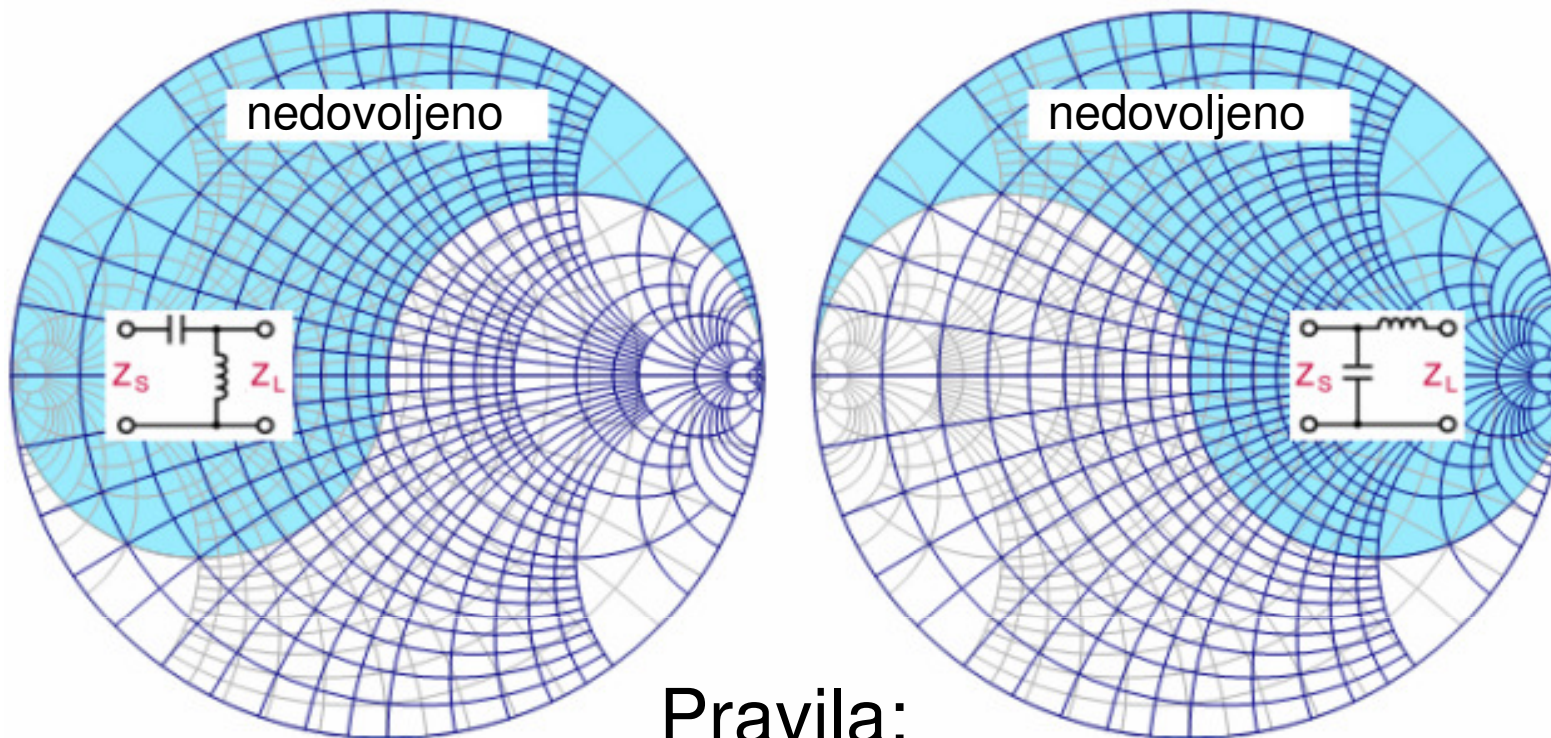
Primeri prilagajanja

Učinek reaktance in susceptance

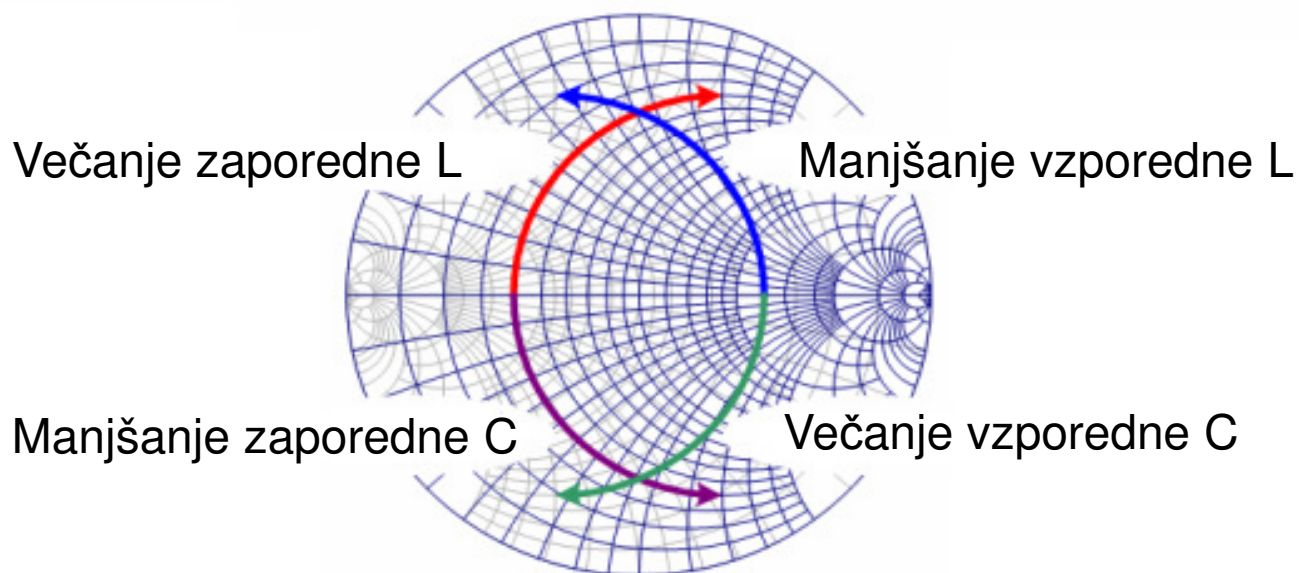
37



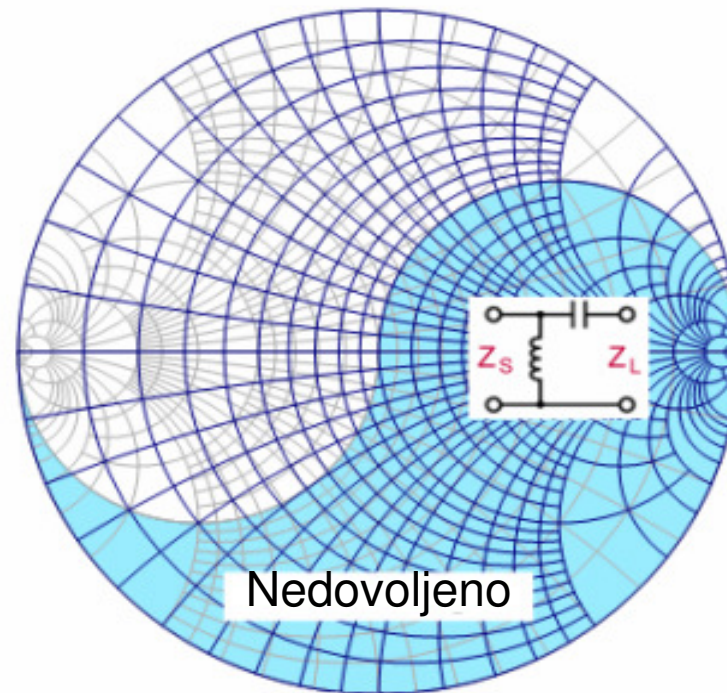
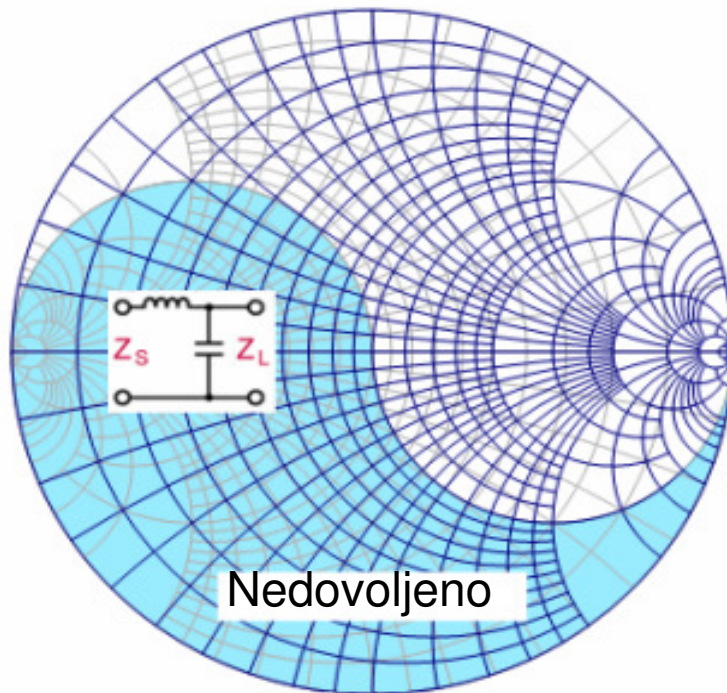
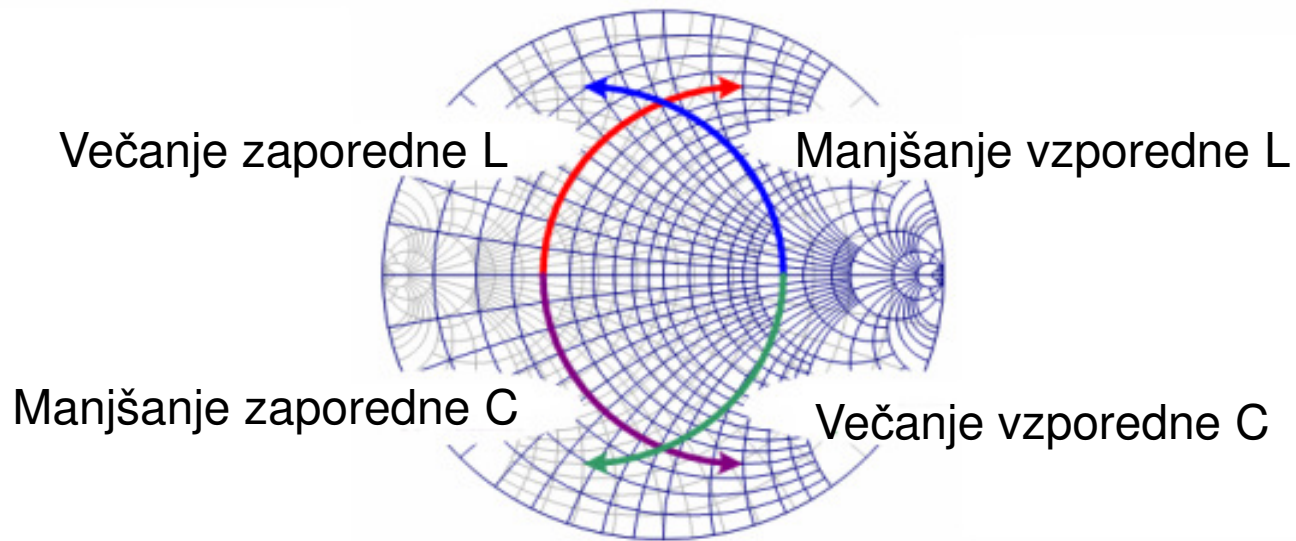
Neuresničljiva področja prilagajanja 1/2 38



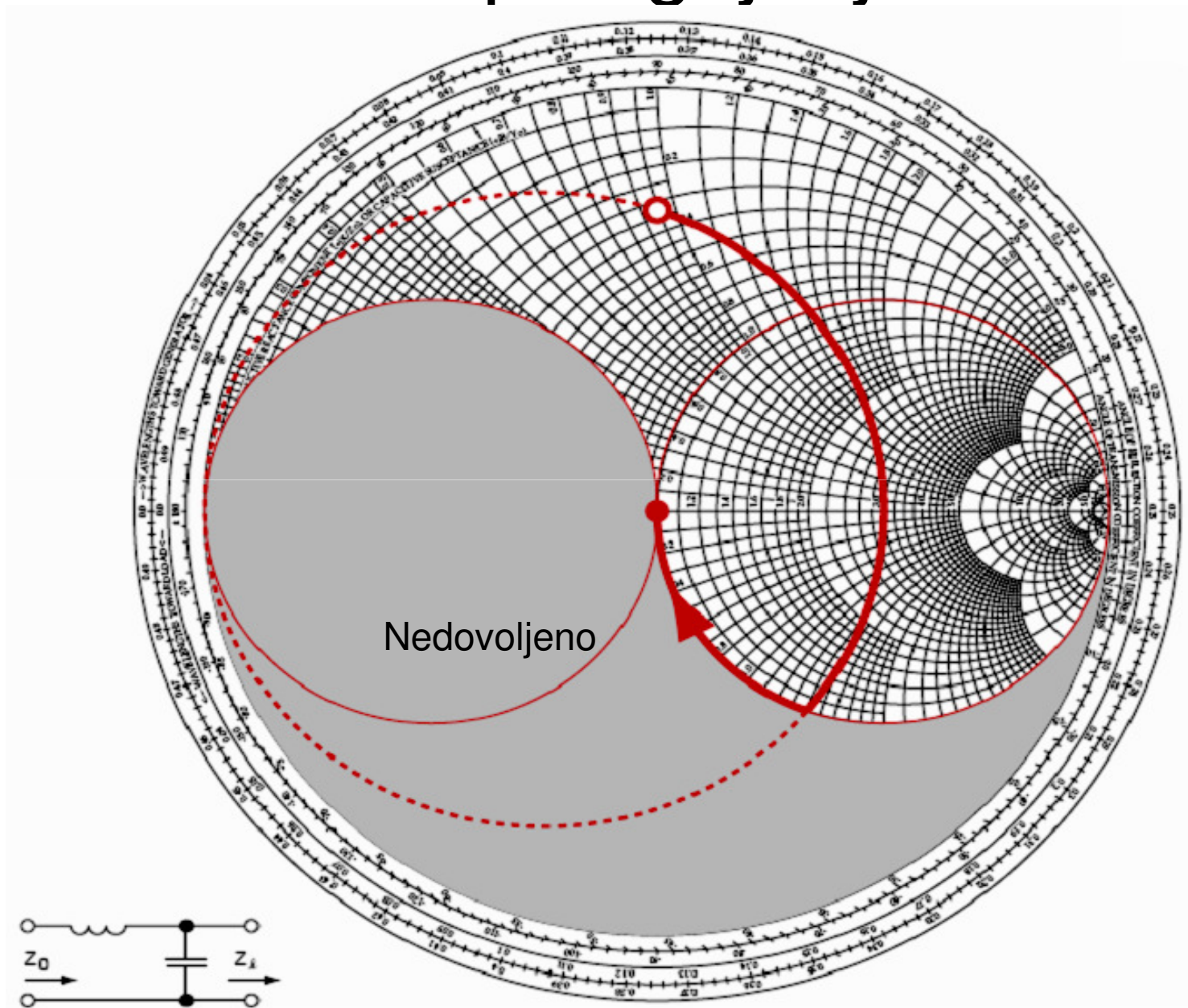
Pravila:



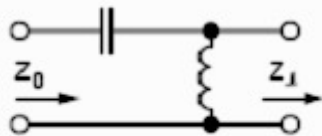
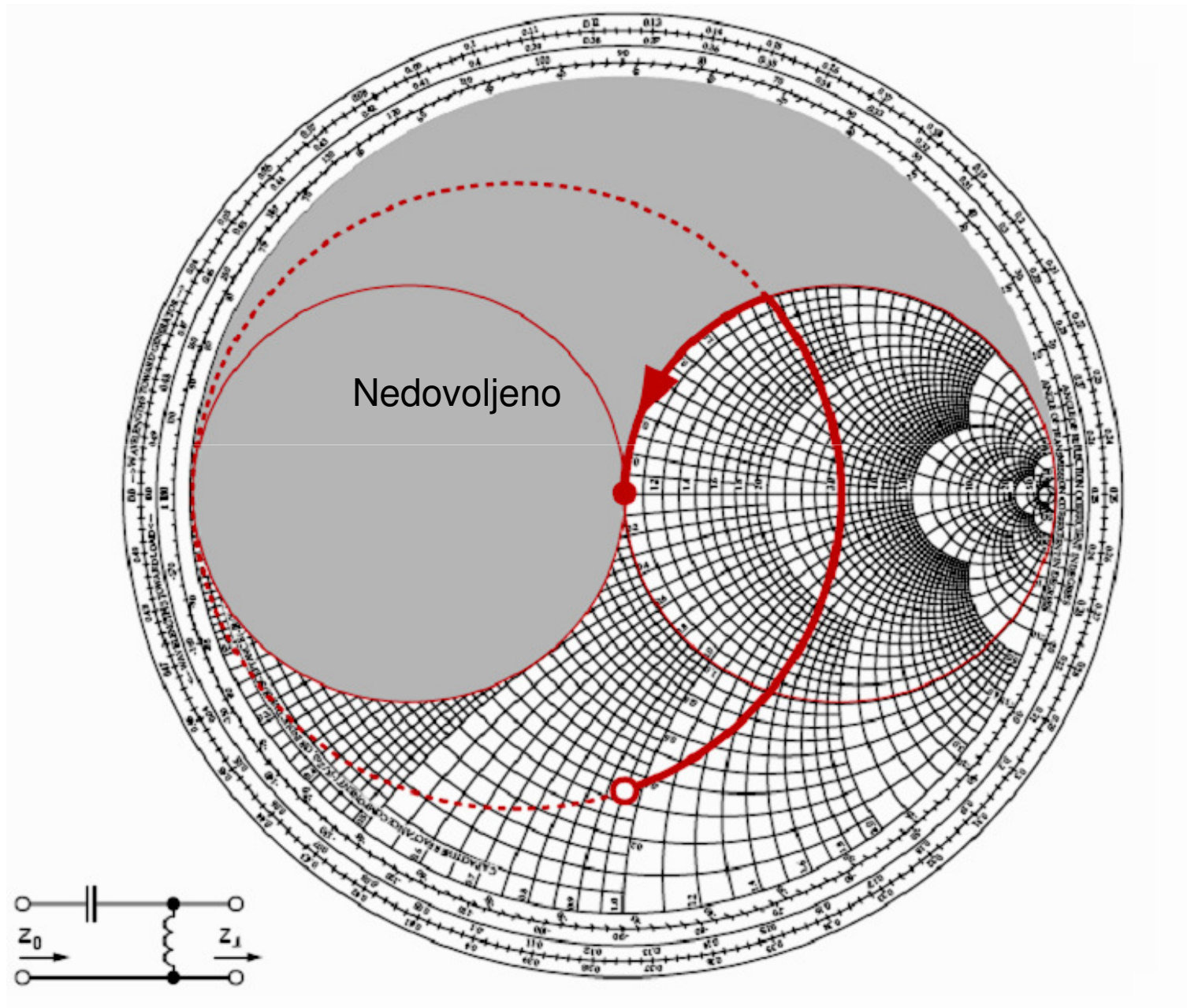
Neuresničljiva področja prilagajanja 2/2 39



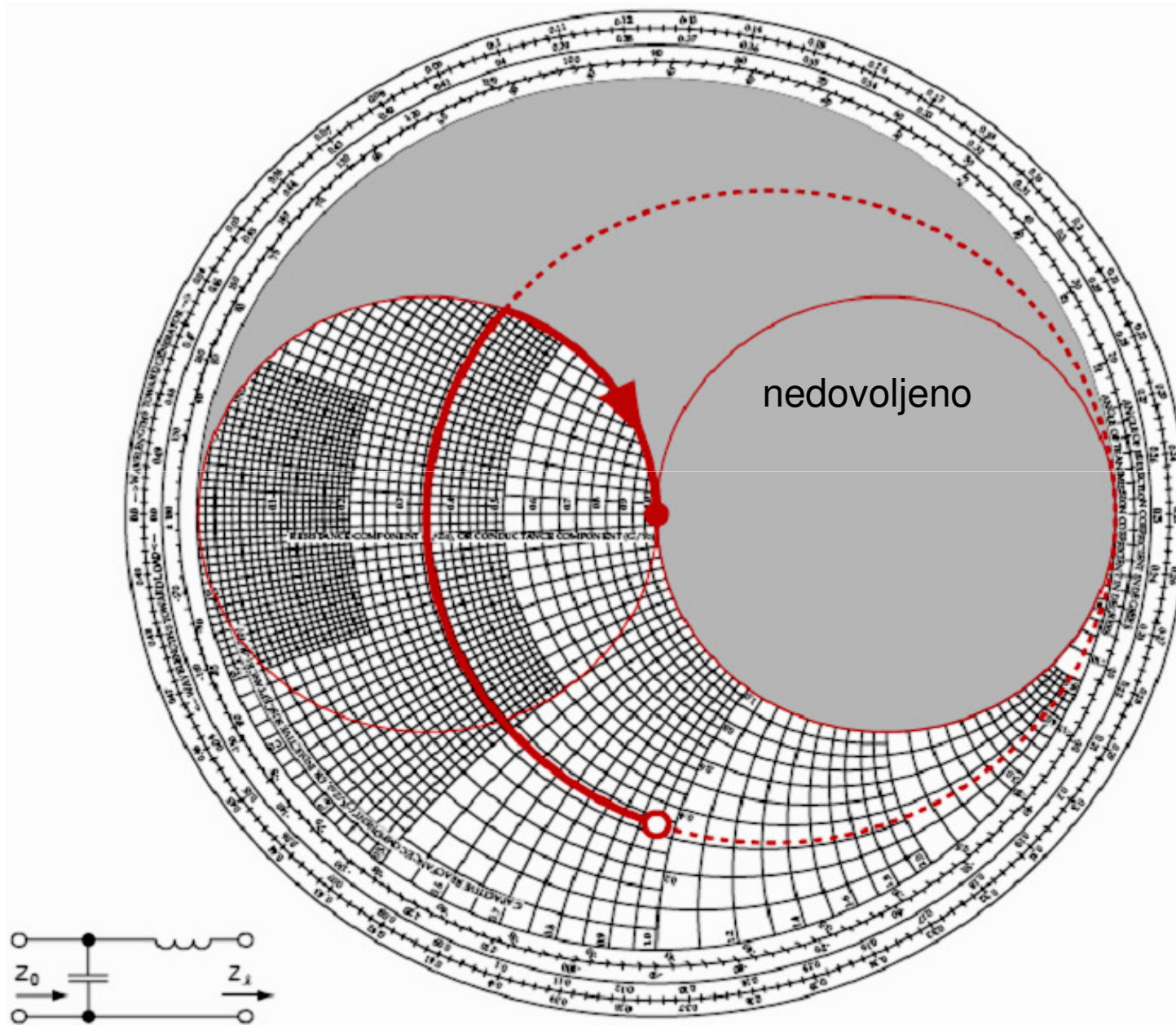
Primeri prilagajanja 1/8



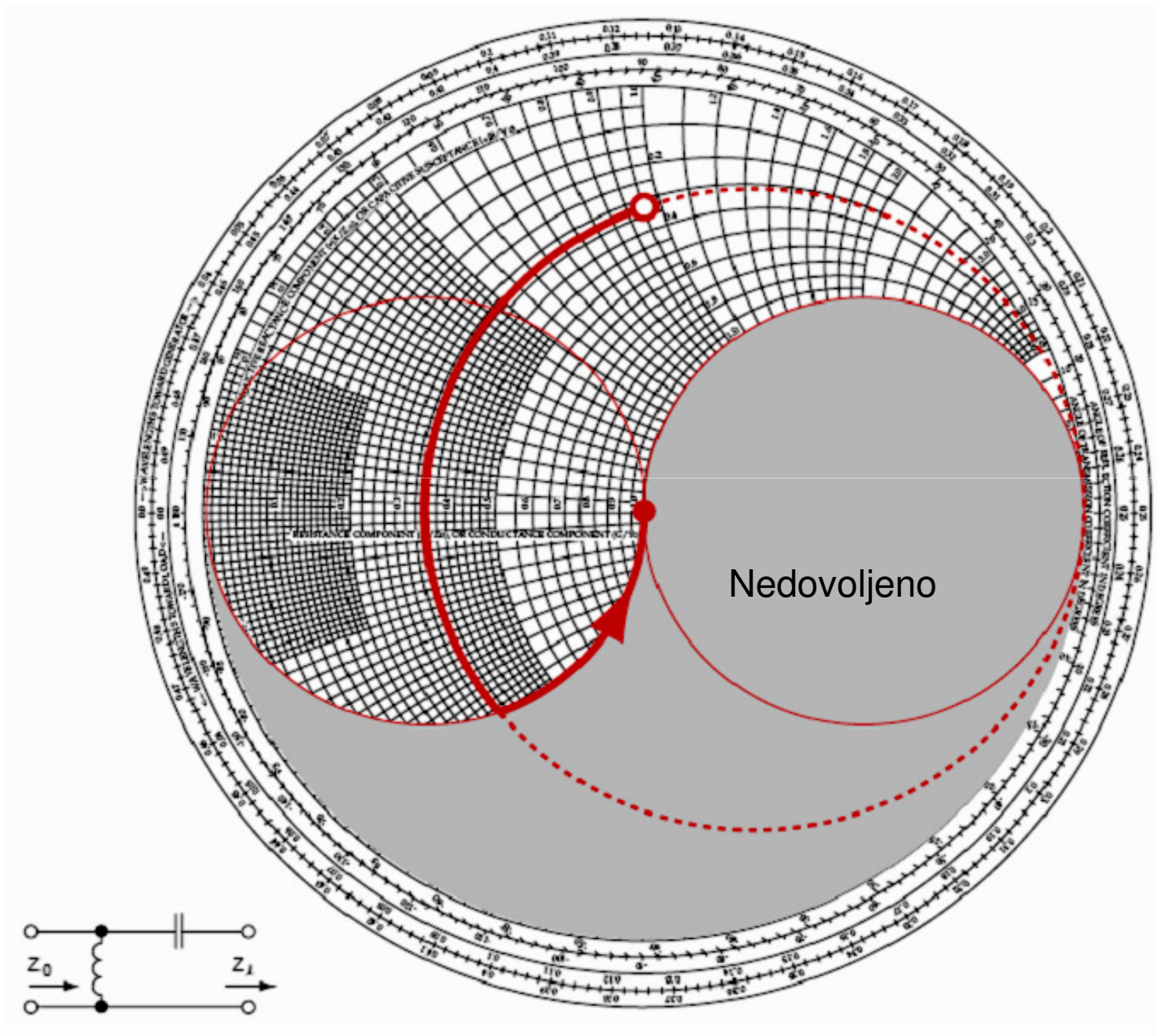
Primeri prilagajanja 2/8



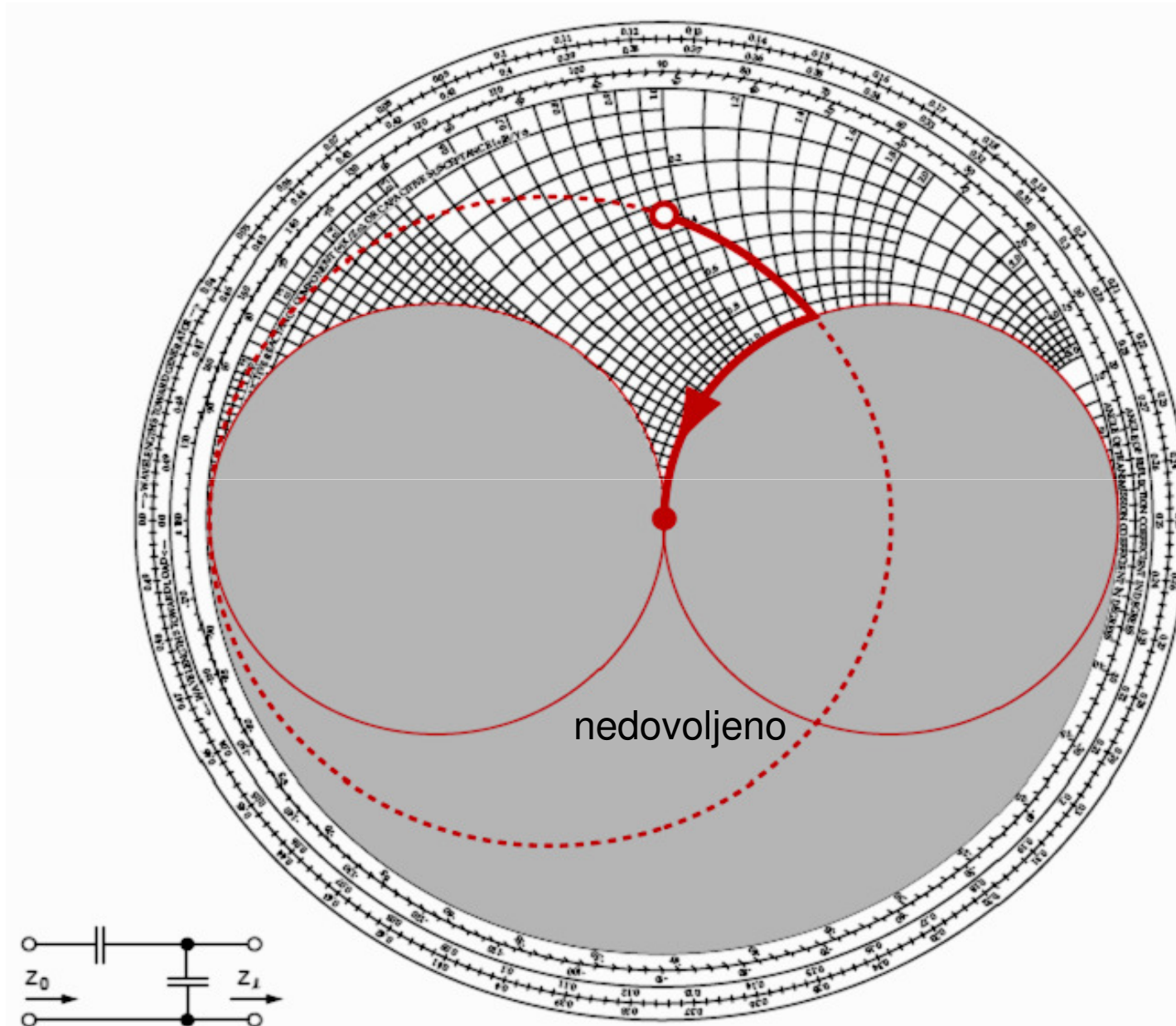
Primeri prilagajanja 3/8



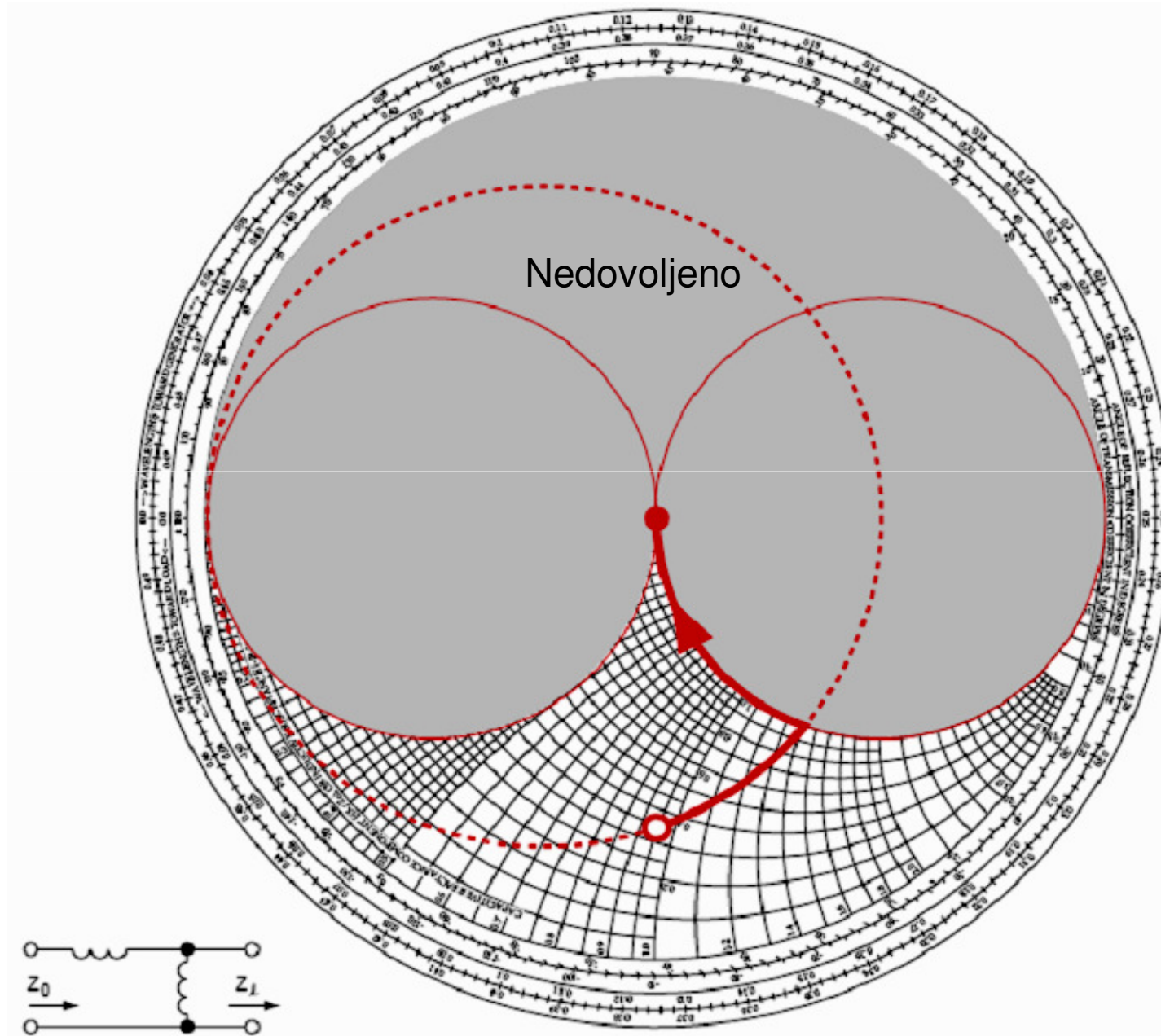
Primeri prilagajanja 4/8



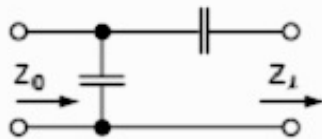
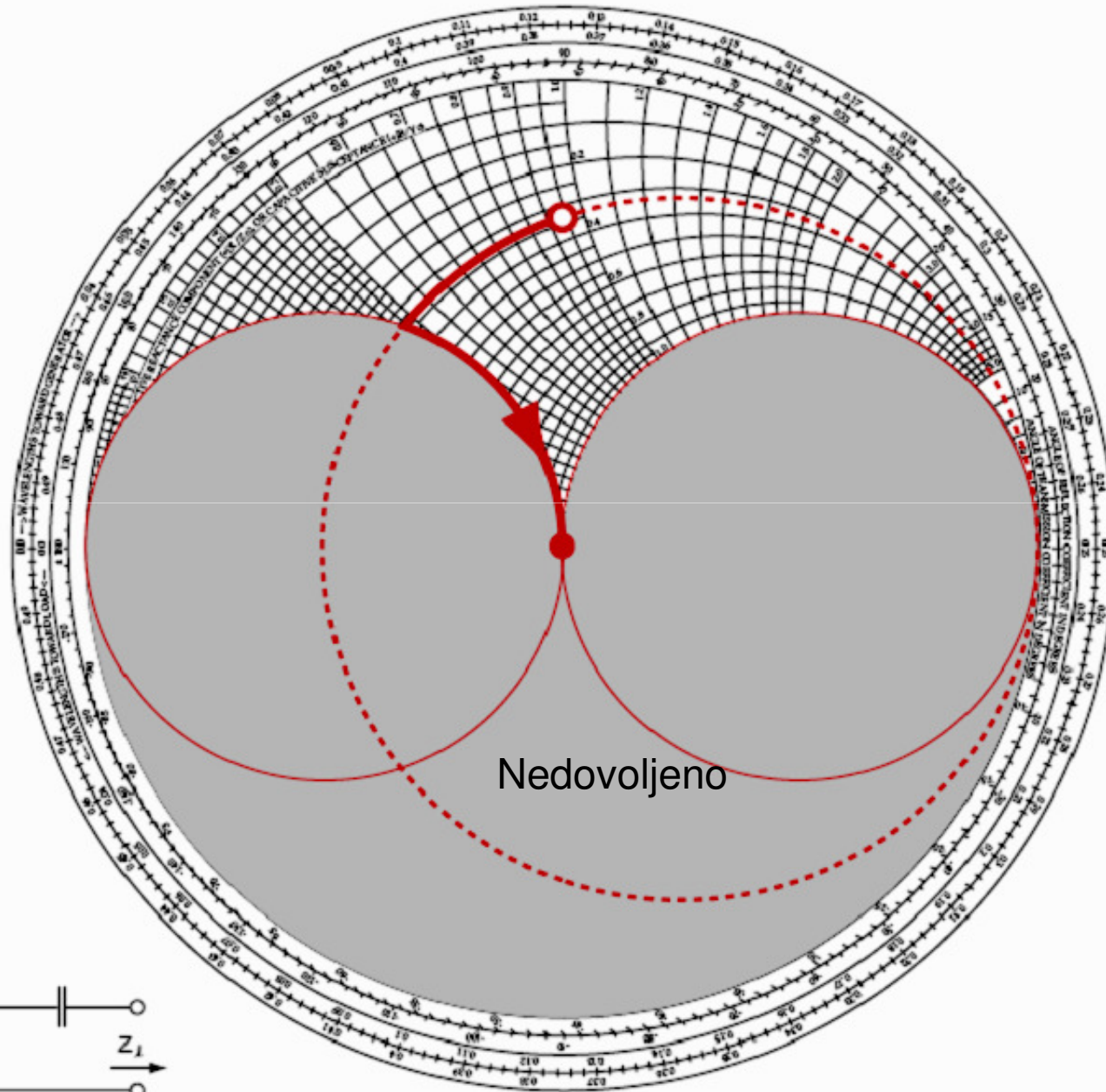
Primeri prilagajanja 5/8



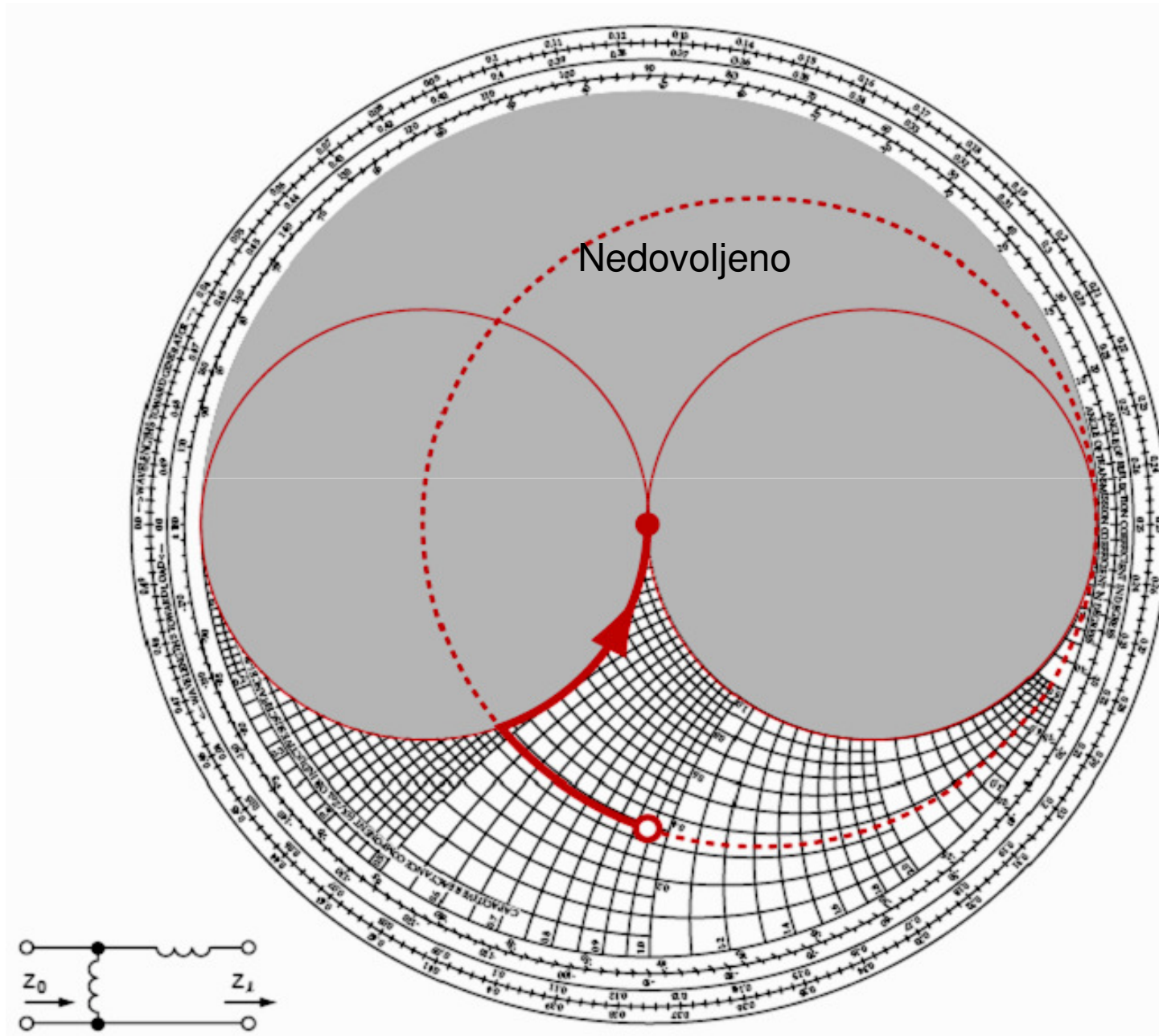
Primeri prilagajanja 6/8



Primeri prilagajanja 7/8

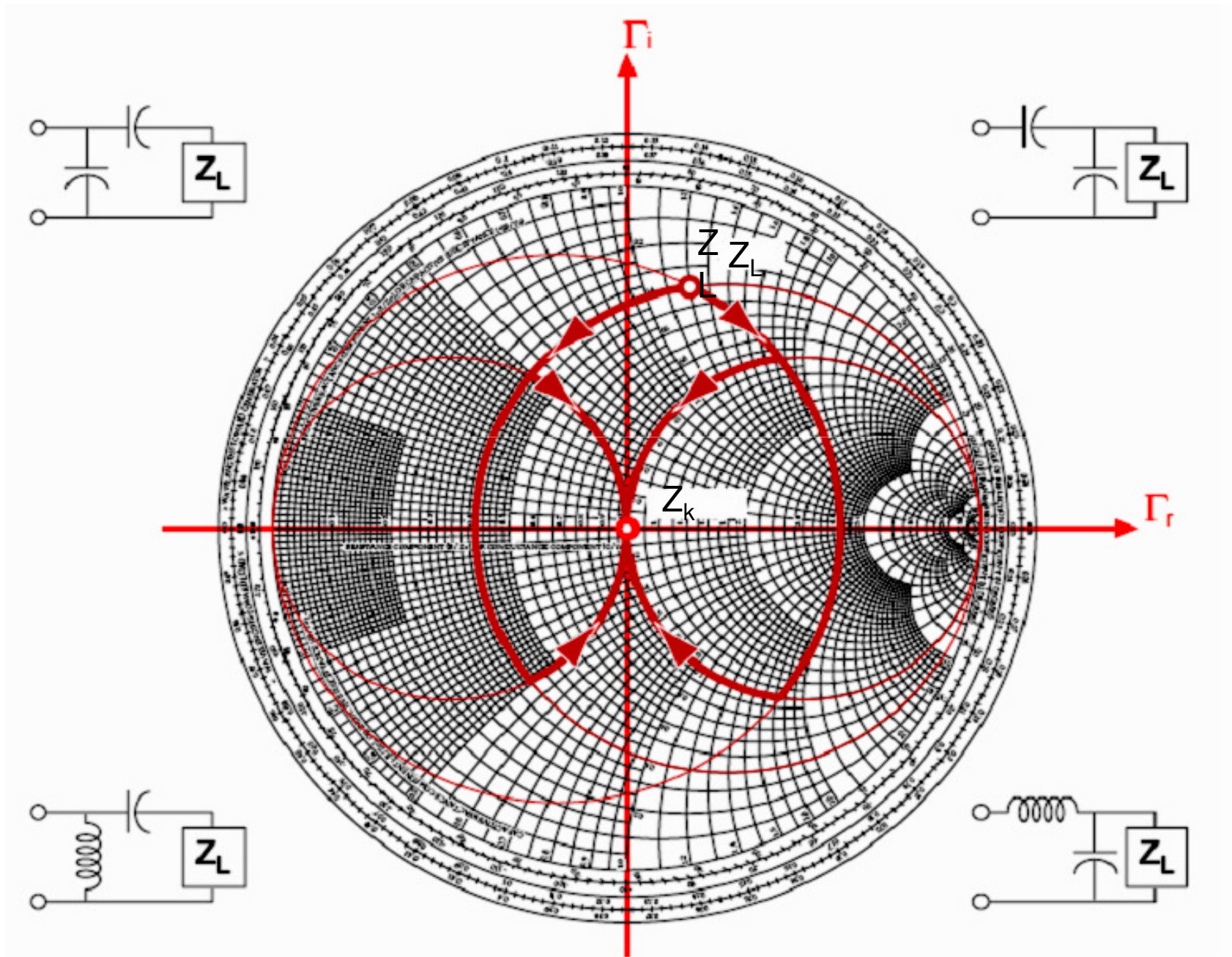


Primeri prilagajanja 8/8



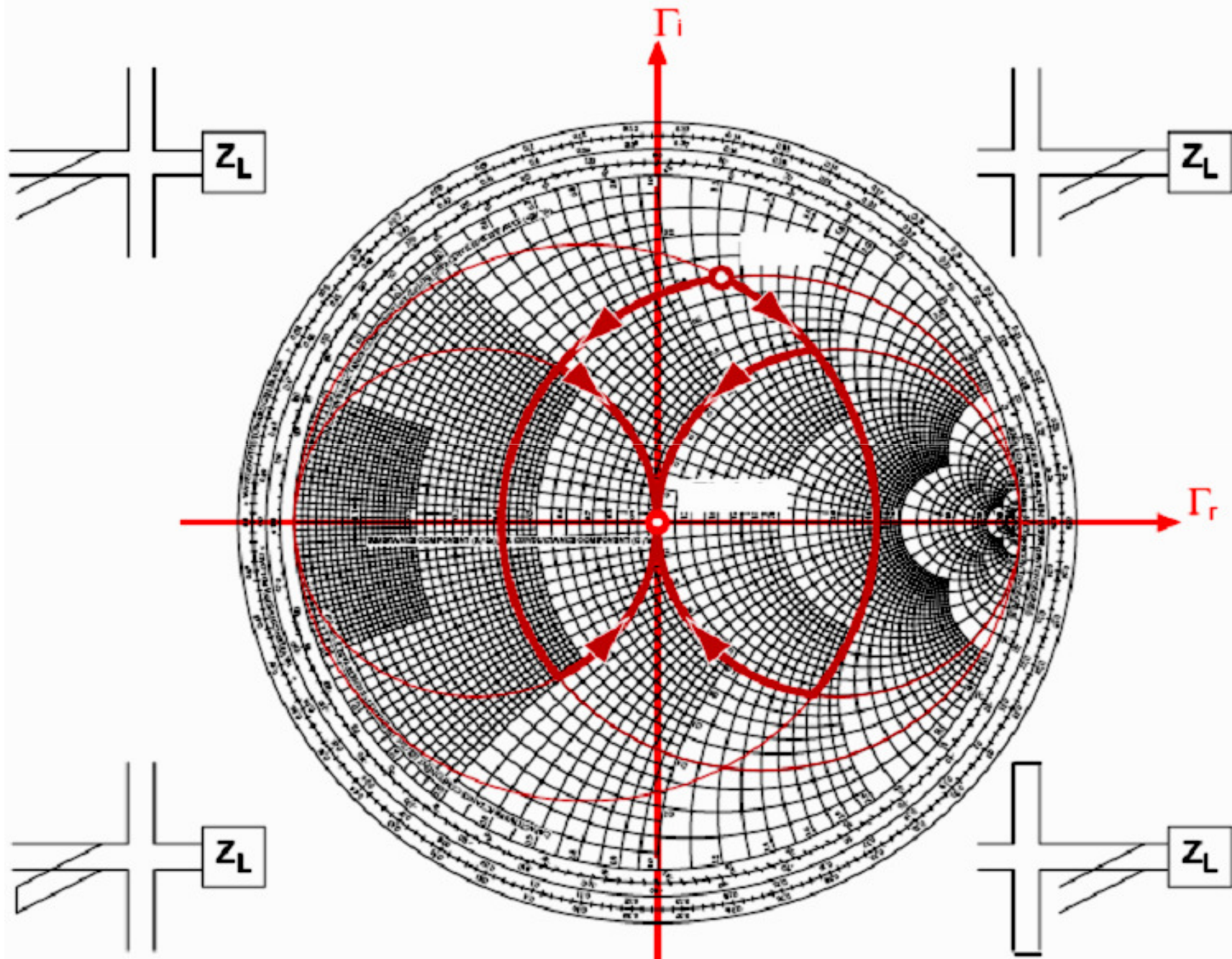
Primeri prilagajanja s členom L

48

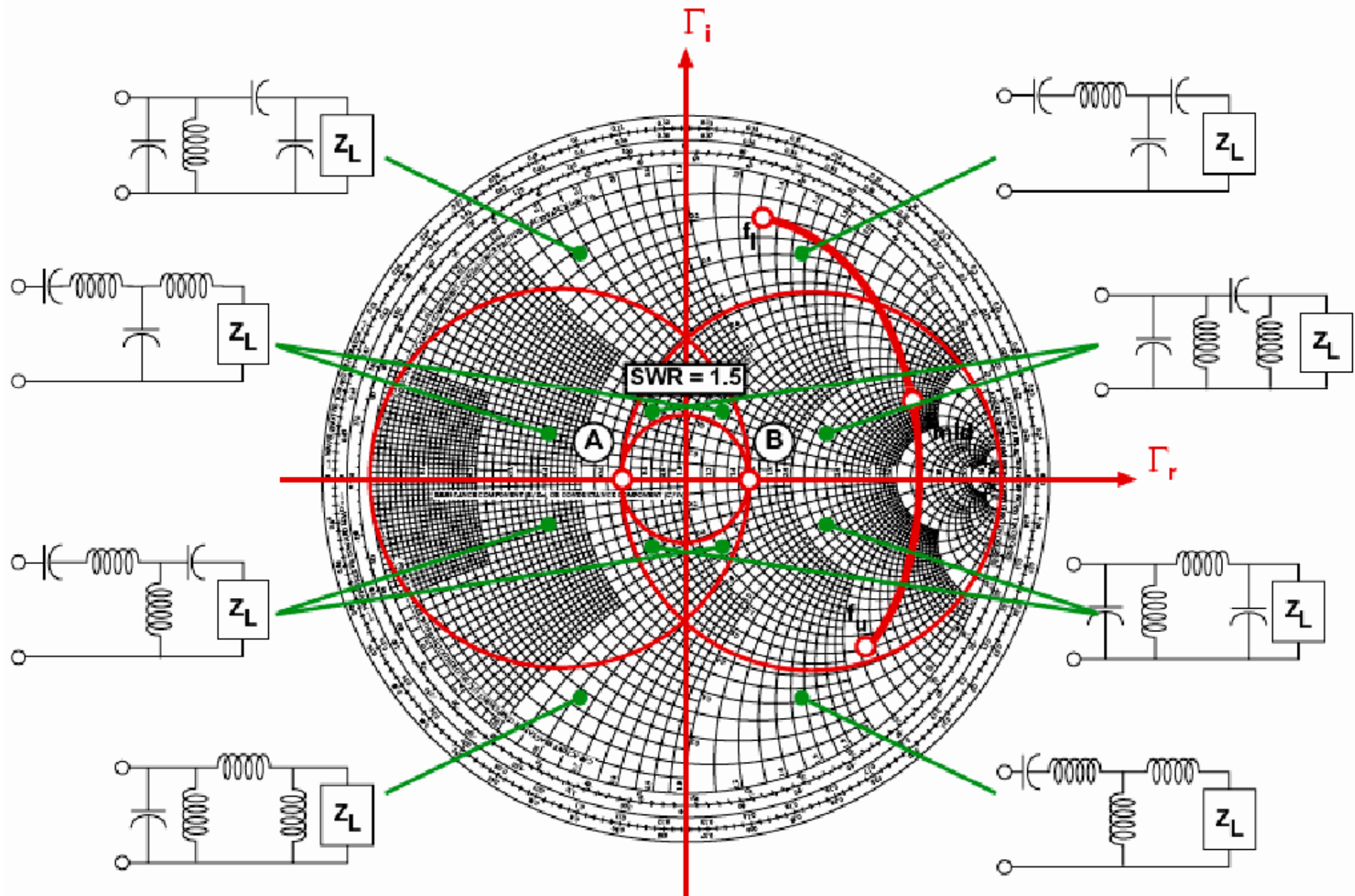


Prilagajanje z linijskimi ubiralkami

49



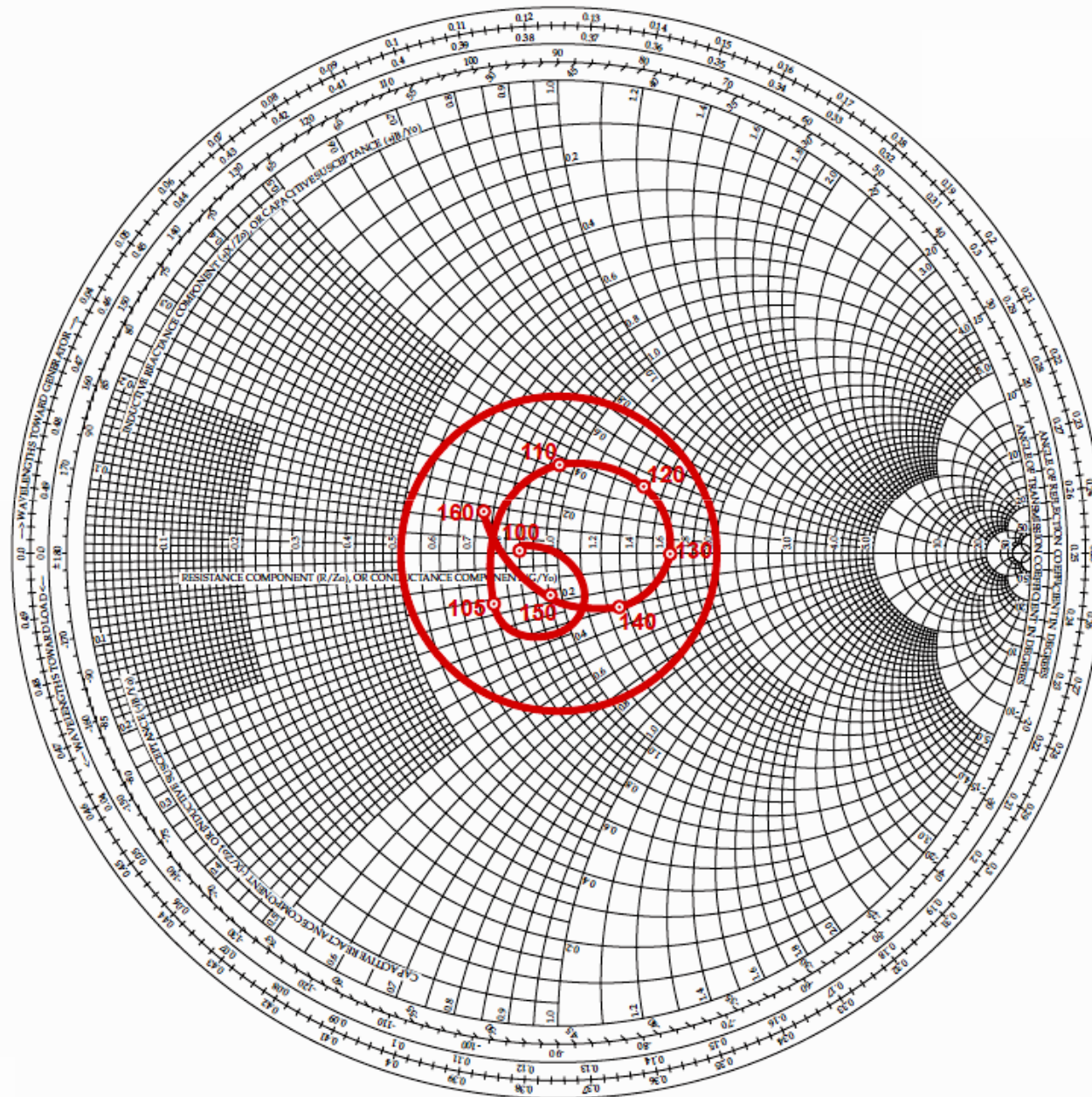
Primernost vezij za kompenzacijo



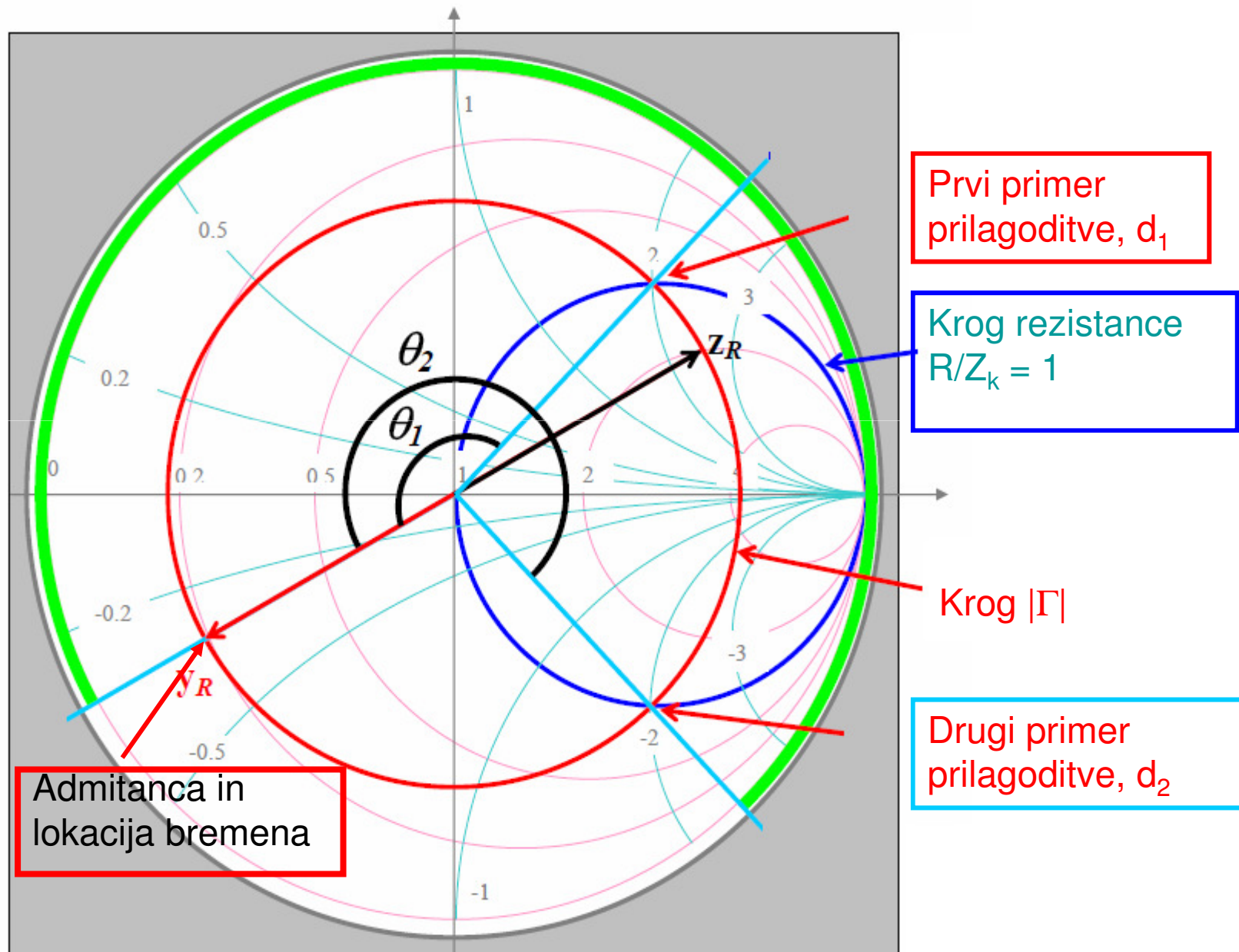
Primer prilagojene impedance

Krog $S = 2$

$S_{\max} = 1,67$

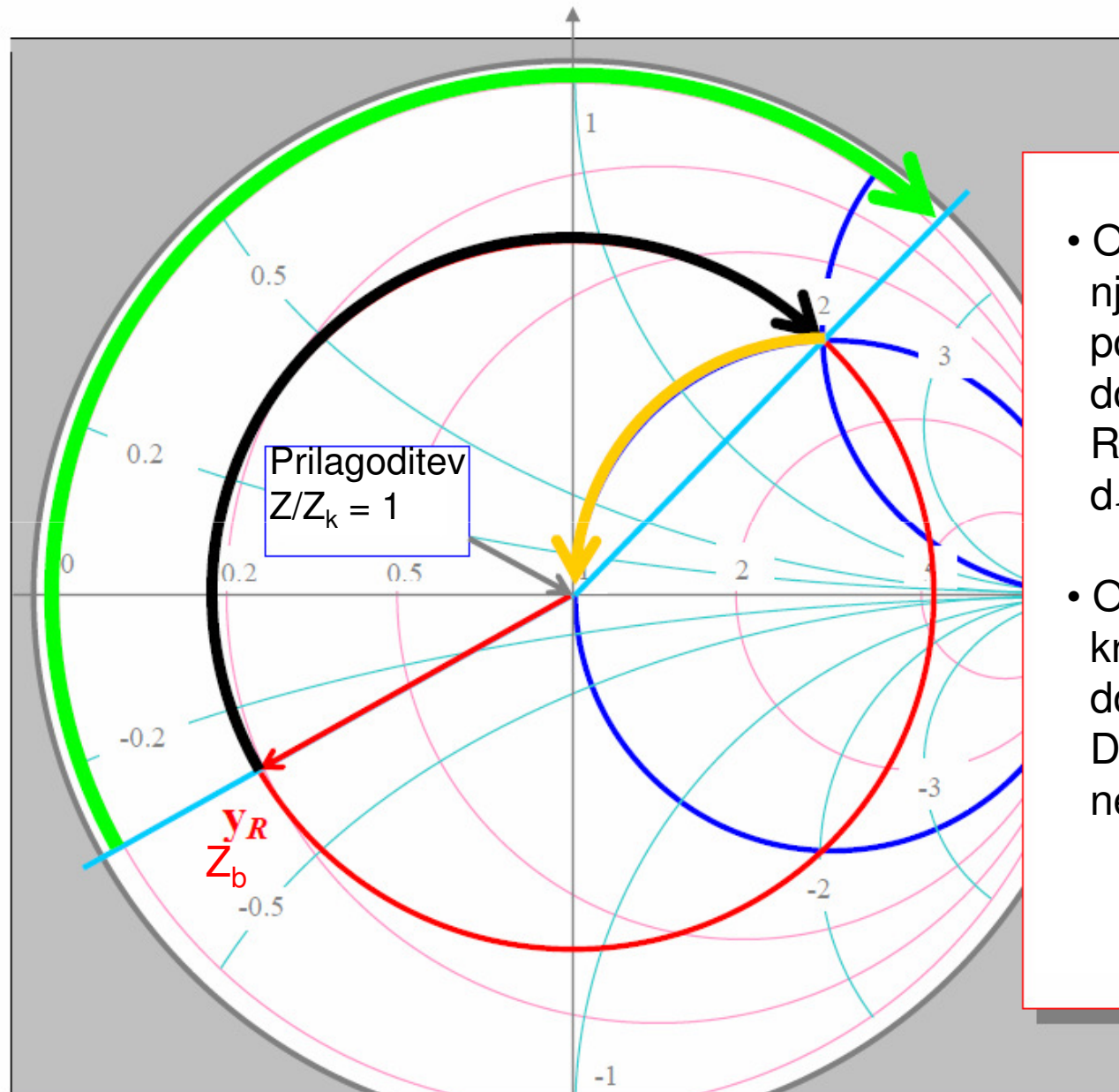


Prilagajanje z ubiralcko



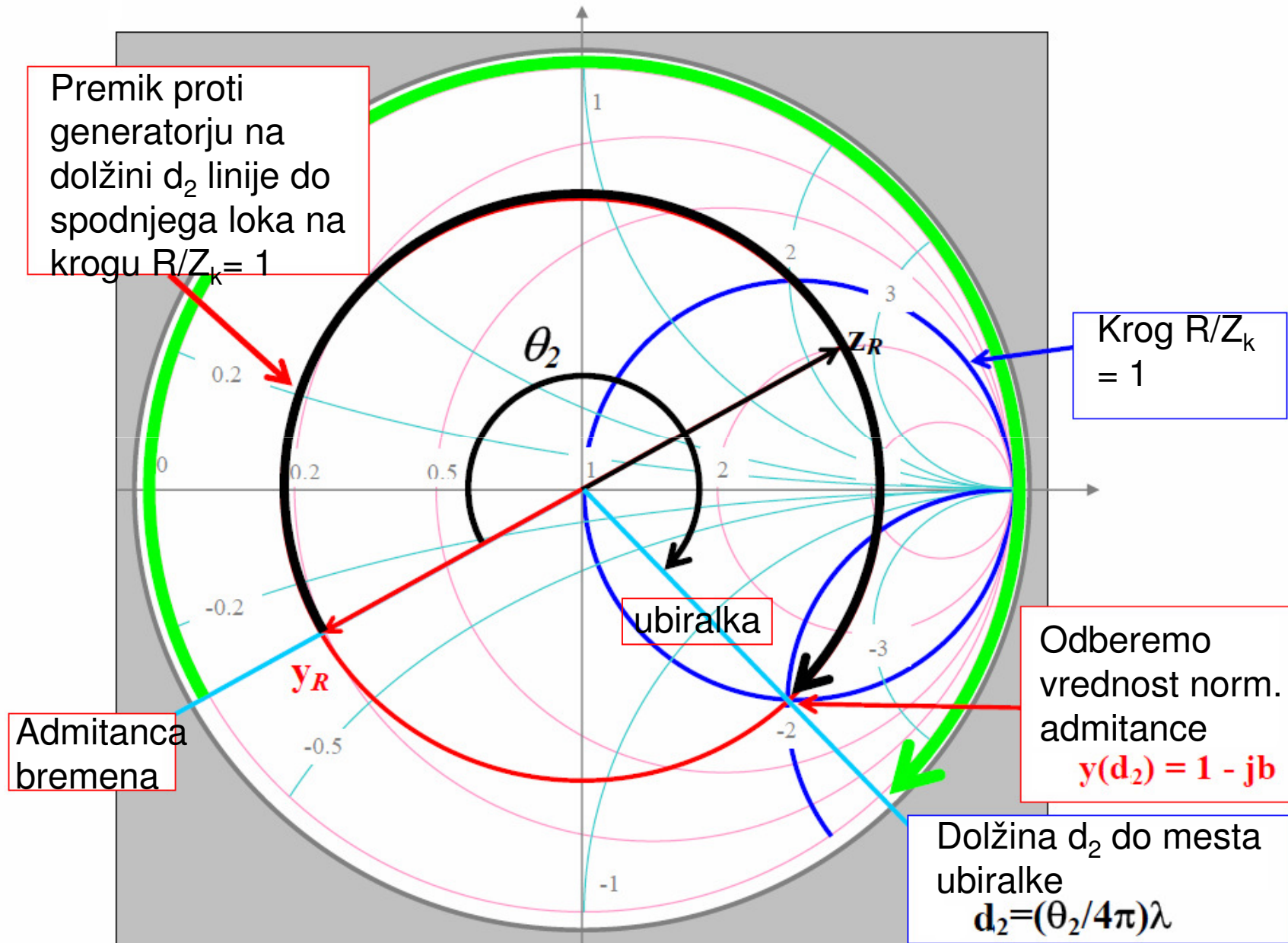
Prilagajanje z ubiralno 1/2

53



- Od konca linije, obremenjene z impedanco Z_b , se po krogu $|\Gamma|$ premaknemo do rezistančnega kroga $R/Z_k = 1$. Določimo dolžino d_1 odseka linije.
- Od presečne točke obeh krogov se premaknemo do središča diagrama. Določimo vrednost negativne reaktance

Prilagajanje z ubiralno 2/2



KONEC